

NAMR-S-112005(自行研究報告)

人類活動排放新興污染物之檢測分析技術 開發研究

(正式報告)

研究主持人：謝炎恭

共同主持人：江政傑

研究員：游勝傑

研究助理：江浩森、馬伶娜、龐宏維、劉昕、李俊宏、李鴻昕、連壘
翔、陳軒轅、潘齊

研究期程：中華民國 112 年 2 月至 112 年 12 月

研究經費：新臺幣 100 萬元整

國家海洋研究院

中華民國 112 年 12 月

「本研究報告僅供國家海洋研究院施政參考，並不代表該院政策，該院保留採用與否之權利。」

「本研究報告絕無侵害他人智慧財產權之情事，如有違背願自負民、刑事責任。」

摘要

臺灣四面環海，人類活動排放的新興污染物(ECs)進入鄰近海域造成海洋生態環境危害，並間接影響人類健康及海洋資源的獲取。隨著微量分析技術的進步及毒性試驗的發展，新興污染物在環境生態的流佈及其對健康造成的風險在國際間日益引起關注，部分新興污染物也相繼被政府納入法規管制。本研究對淡水河流域及入海口鄰近海域水體中的有機磷酸酯(OPEs)及塑膠微粒(MPs)等新興污染物流布，進行調查分析及風險評估研究，以供政府相關涉海機關未來研訂相關政策參據。

OPEs 研究結果以溶解相濃度較高且為主要貢獻來源，其濃度介於 0.38~1,652.2 ng/L，顆粒相 OPEs 濃度則為 0.83~109.1 ng/L，以淡水河上游地區(TS0)最低，另 OPEs 不論是在溶解相或顆粒相中皆以氯化 OPEs 為主要物種，推測可能原因為氯化 OPEs 在環境中有較長的持久性及來源。在總 OPEs 濃度(顆粒相+溶解相)中，以下游 TS4 採樣點的 OPEs 濃度最低，原因可能為其接近入海口，導致總 OPEs 濃度較低，此與其他相關研究結果相符。汛期的七至九月間，下游 TS4 的 OPEs 濃度較高，推測可能受臺灣夏季常有颱風和降雨影響，導致污染物沖刷至下游，另一可能原因為夏季旅遊人潮及活動多，致使 OPEs 濃度提升。此外，與其他國家研究結果相較，本研究結果的 OPEs 濃度屬中間值，未呈現高濃度變化，風險評估結果同樣呈現(RQ<0.1)無顯著風險。

另分析水體中的 MPs，結果發現各採樣點皆有 MPs，其濃度為 22~46 items/L，平均濃度則為 31 ± 1.04 items/L，MPs 濃度變化可能與降雨、人類活動及土地使用有關。各採樣點的 MPs 濃度以下游 TS4 較少，其原因可能是入海口地區有較明顯的海水稀釋效應所導致。另

汛期的七至八月間，以 TS4 的 MPs 濃度較其他採樣點高，推測可能原因與 OPEs 相同。觀測 MPs 形狀、尺寸和顏色等特徵，形狀以碎片為主要類型，尺寸範圍以 51~100 μm 為主體，透明或白色為主要顏色。

關鍵字：人類活動、淡水河流域、新興污染物、有機磷酸酯、塑膠微粒

Abstract

Taiwan is surrounded by the ocean on all sides, and emerging contaminants (ECs) emitted from human activities enter the adjacent marine areas, causing ecological harm to the marine environment and indirectly affecting human health and the acquisition of marine resources. With the advancement of trace analysis techniques and the development of toxicity tests, the international community has increasingly expressed concerns about the distribution of ECs in the environmental ecosystem and the associated risks to health. Some of these ECs have been progressively incorporated into governmental regulations. This study investigates and analyzes the distribution of organophosphate esters (OPEs) and microplastics (MPs), among other ECs, in the Tamsui River and the adjacent marine areas near estuaries. The research includes risk assessments and aims to provide data for relevant government agencies involved in maritime affairs to formulate future policies.

The research results on OPEs indicate that the dissolved concentration is higher and constitutes the main contributing source, with concentrations from 0.38 to 1,652.2 ng/L. The concentration of particle from 0.83 to 109.1 ng/L, with the lowest values observed in the upstream of the Tamsui River (TS0). Chlorinated OPEs are identified as the predominant species in both the dissolved and particle of OPEs, maybe attributed to the longer persistence and sources of chlorinated OPEs in the environment. In terms of total OPEs concentration (sum of particle and dissolved), the downstream sampling point TS4 exhibits the lowest OPEs concentration, possibly due to its proximity to the estuary, resulting in a lower total OPEs concentration, consistent with other relevant research results. During the flood season from July to September, higher OPEs concentrations are observed at downstream TS4, indicating a potential influence from

typhoons and rainfall during Taiwan's summer, leading to the washout of pollutants downstream. Another possible factor is the increased tourism and activities during the summer, contributing to elevated OPEs concentrations. Additionally, when compared to research results from other countries, the OPEs concentrations in this study fall within the intermediate range, showing no significant variations in high concentrations. The risk assessment results also indicate a lack of significant risk ($RQ < 0.1$), aligning with the findings of this study.

Analysis of MPs in the water, it was observed that plastic particles were present at all sampling, with concentrations from 22 to 46 items/L. The average concentration was determined to be 31 ± 1.04 items/L. The variation in MPs concentrations may be associated with factors such as rainfall, human activities, and land use. Downstream TS4 exhibited a lower concentration of MPs compared to other sampling, possibly due to a more pronounced dilution effect from seawater in the estuarine area. During the flood season in July and August, TS4 showed higher MPs concentrations compared to other sampling points, suggesting a potential correlation with the factors influencing OPEs. Observations of the characteristics of MPs, including shape, size, and color, revealed that fragments were the predominant type, with sizes ranging mainly from 51 to 100 μm , and transparent or white as the primary colors.

Keywords : Human activity, Tamsui River, Emerging contaminants, Organophosphate esters (OPEs), Microplastics (MPs)

目 錄

摘 要.....	I
Abstract.....	III
目 錄.....	V
圖目錄.....	VII
表目錄.....	IX
壹、前言	1
1.1 緣起及目標	1
1.2 研究範圍	1
2.1 有機磷酸酯(Organophosphate esters, OPEs).....	3
2.1.1 OPEs 特性及環境分布概況.....	6
2.1.2 OPEs 生產和使用	9
2.1.3 全球河川中有機磷酸酯(OPEs)研究.....	11
2.2 微塑膠(Microplastics, MPs)	15
2.2.1 微塑膠來源	16
2.2.2 微塑膠接觸人類途徑與危害	17
參、研究材料與方法	19
3.1 採樣規劃	19
3.2 材料與儀器	20
3.2.1 實驗材料	20
3.2.2 分析儀器	22
3.3 樣品前處理	23
3.3.1 OPEs 樣品前處理	23
3.3.2 MPs 樣品前處理	24
3.4 方法回收率	25
3.5 實驗空白分析	25
3.6 風險評估	25
肆、結果與討論	27
4.1 OPEs.....	27
4.1.1 OPEs 濃度分布	27
4.1.2 OPEs 濃度組成	37
4.1.3 OPEs 與其他國家之比較.....	40
4.1.4 風險評估	40
4.2 微塑膠	55
4.2.1 微塑膠濃度分布	55
4.2.2 微塑膠特徵組成	55
4.2.3 微塑膠全球文獻之比較	67
伍、結論.....	69

參考文獻.....	70
附 錄.....	75

圖目錄

圖 1 淡水河主要支流.....	2
圖 2 一般 OPEs 結構通式	3
圖 3 OPEs 分類	4
圖 4 有機磷酸酯於環境中之分布.....	7
圖 5 常見有機磷酸酯(OPEs)在各種環境中的途徑.....	8
圖 6 2008 年和 2017 年全球阻燃劑消費量(噸).....	9
圖 7 不同地區有機磷酸酯阻燃劑和增塑劑的消費量.....	10
圖 8 中國北方 40 條河流中 12 種 OPFR 濃度百分比組成.....	13
圖 9 本研究採樣點位.....	19
圖 10 本研究採樣點位.....	20
圖 11 採樣前處理流程.....	24
圖 12 四月各測站顆粒相與溶解相之 OPEs 濃度	34
圖 13 五月各測站顆粒相與溶解相之 OPEs 濃度	34
圖 14 七月各測站顆粒相與溶解相之 OPEs 濃度	35
圖 15 八月各測站顆粒相與溶解相之 OPEs 濃度	35
圖 16 九月各測站顆粒相與溶解相之 OPEs 濃度	36
圖 17 十月各測站顆粒相與溶解相之 OPEs 濃度	36
圖 18 四月 OPEs 組成.....	37
圖 19 五月 OPEs 組成.....	38
圖 20 七月 OPEs 組成.....	38
圖 21 八月 OPEs 組成.....	39
圖 22 九月 OPEs 組成.....	39
圖 23 十月 OPEs 組成.....	40
圖 24 四月微塑膠形狀比例圖	56
圖 25 五月微塑膠形狀比例	57
圖 26 七月微塑膠形狀比例	57
圖 27 八月微塑膠形狀比例	58
圖 28 九月微塑膠形狀比例	58
圖 29 十月微塑膠形狀比例	59

圖 30	生物顯微鏡下典型形狀特徵.....	59
圖 31	四月微塑膠尺寸比例.....	61
圖 32	五月微塑膠尺寸比例.....	61
圖 33	七月微塑膠尺寸比例.....	62
圖 34	八月微塑膠尺寸比例.....	62
圖 35	九月微塑膠尺寸比例.....	63
圖 36	十月微塑膠尺寸比例.....	63
圖 37	四月微塑膠顏色比例.....	64
圖 38	五月微塑膠顏色比例.....	64
圖 39	七月微塑膠顏色比例.....	65
圖 40	八月微塑膠顏色比例.....	65
圖 41	九月微塑膠顏色比例.....	66
圖 42	十月微塑膠顏色比例.....	66
圖 43	以生物顯微鏡觀測微塑膠典型顏色樣式.....	67

表目錄

表 1 一般常見 OPEs 結構式.....	5
表 2 全球河川中的有機磷酸酯(OPEs)研究與比較	12
表 3 水生生物的風險商數(RQ) (Truong et al., 2023).....	14
表 4 四月各採樣測站 OPEs 濃度	28
表 5 五月各採樣測站 OPEs 濃度	29
表 6 七月各採樣測站 OPEs 濃度	30
表 7 八月各採樣測站 OPEs 濃度	31
表 8 九月各採樣測站 OPEs 濃度	32
表 9 十月各採樣測站 OPEs 濃度	33
表 10 OPEs 與其他國家之比較	41
表 11 四月各採樣測站 7 種 OPEs 之風險商數(RQ).....	42
表 12 五月各採樣測站 7 種 OPEs 之風險商數(RQ)	45
表 13 七月各採樣測站 7 種 OPEs 之風險商數(RQ)	47
表 14 八月各採樣測站 7 種 OPEs 之風險商數(RQ)	49
表 15 九月各採樣測站 7 種 OPEs 之風險商數(RQ)	51
表 16 十月各採樣測站 7 種 OPEs 之風險商數(RQ)	53
表 17 各採樣測站微塑膠濃度.....	55
表 18 本研究與國內外研究結果	68

壹、前言

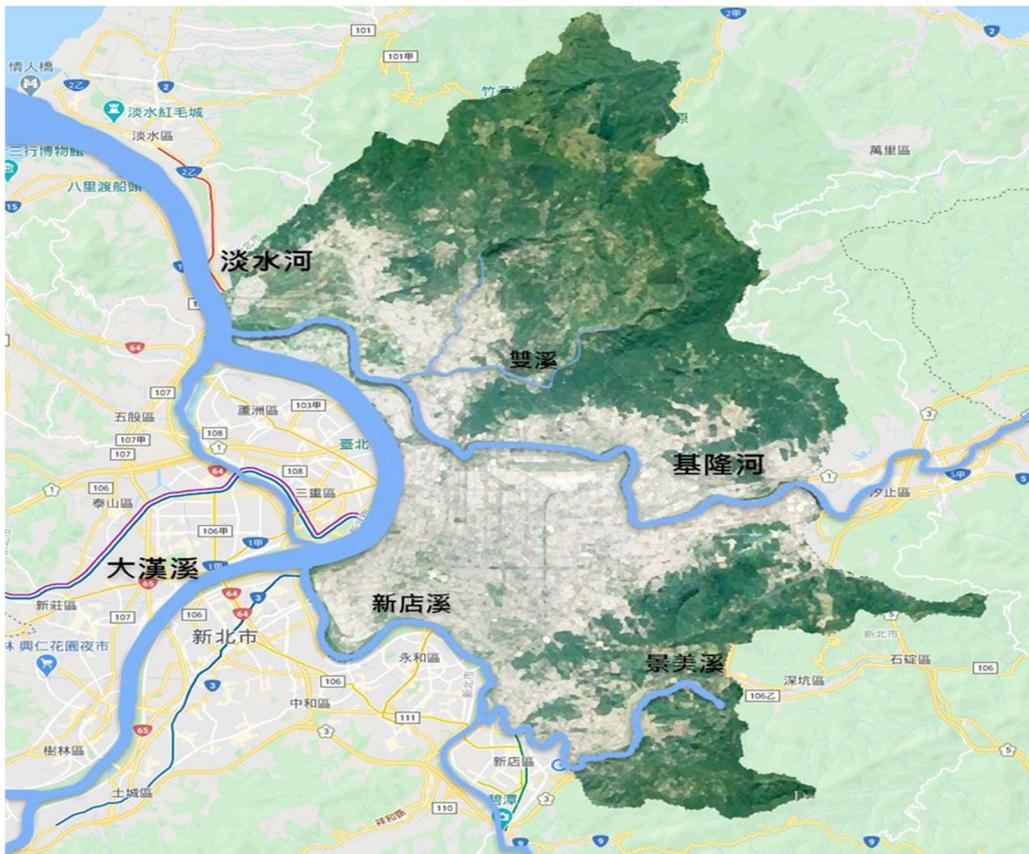
1.1 緣起及目標

聯合國國際海事組織(International Maritime Organization, IMO)分析海洋污染源結果，指出陸域源(44%)為衝擊海域環境及生態之主要來源。近年，經由人類活動(如工業、食品、農業、醫藥及民生等)產生之新興污染物(Emerging Contaminants, ECs)，對海洋生態環境之危害漸受到國際重視。新興污染物(ECs)一般指未受法規管制、先前未確認或新認定，且對人體健康及環境生態具危害風險性的物質，涵蓋範圍廣泛，如個人保健與衛生藥品(pharmaceuticals and personal care products, PPCPs)、內分泌干擾物(Endocrine Disrupting Chemicals, EDCs)、工業用奈米級物質與化學物質、法令管制藥品等皆屬新興污染物範疇(Noguera-Oviedo et al, 2016)，臺灣四面環海，人類活動排放之新興污染物進入鄰近海域造成海洋生態環境危害，並間接影響人類健康及海洋資源之獲取。隨著微量分析技術的不斷進步及毒性試驗的不斷發展，新興污染物在環境生態的流佈及其對健康造成的風險在國際間日益引起關注，部分新興污染物也相繼被政府納入法規管制範疇。本研究針對河川及入海口鄰近海域水體等環境之塑膠微粒(Microplastics, MPs)及有機磷酸酯(Organophosphate esters, OPEs)等新興污染物流布，進行調查分析及風險評估研究，提供政府相關涉海機關未來研訂相關政策參據。

1.2 研究範圍

本研究 112 年調查範圍為淡水河流域水體及其入海口鄰近海域水體。淡水河包括大漢溪、基隆河、新店溪等三大支流(圖 1 所示)，為臺灣北部重要河川之一，淡水河流域範圍涵蓋新北市、臺北市、基

隆市、桃園市、新竹縣與宜蘭縣等行政轄區，流域長度及面積分別為 323.4 公里及 2,726 平方公里，為臺灣第三長河川及北臺灣流域面積最大的河川。流域人口密集，工商業發達，是臺灣政經及文化中心。淡水河與大臺北地區發展脈絡息息相關，隨著都市人口增長，在近代亦扮演供給農業灌溉、民生用水、都市排水與防洪功能等角色。近年民眾對生活品質與環境保護意識提升，進而更重視其生態保育功能。本研究自淡水河流域上游至其入海口規劃進行調查分析，採樣點涵蓋不同地理位置和人類活動強度，並彙集流域相關環境資料，探討 MPs 與 OPEs 於環境中流布。另蒐集有關人類活動(如漁業、工業和旅遊)資料，評估對 MPs 與 OPEs 污染的貢獻。



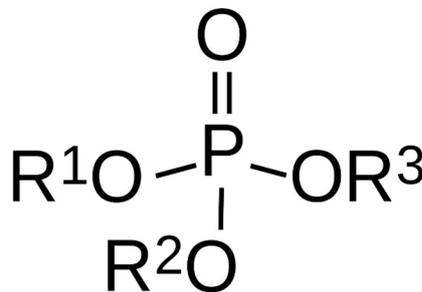
資料來源：臺北市政府工務局水利工程處

圖 1 淡水河主要支流

貳、文獻回顧

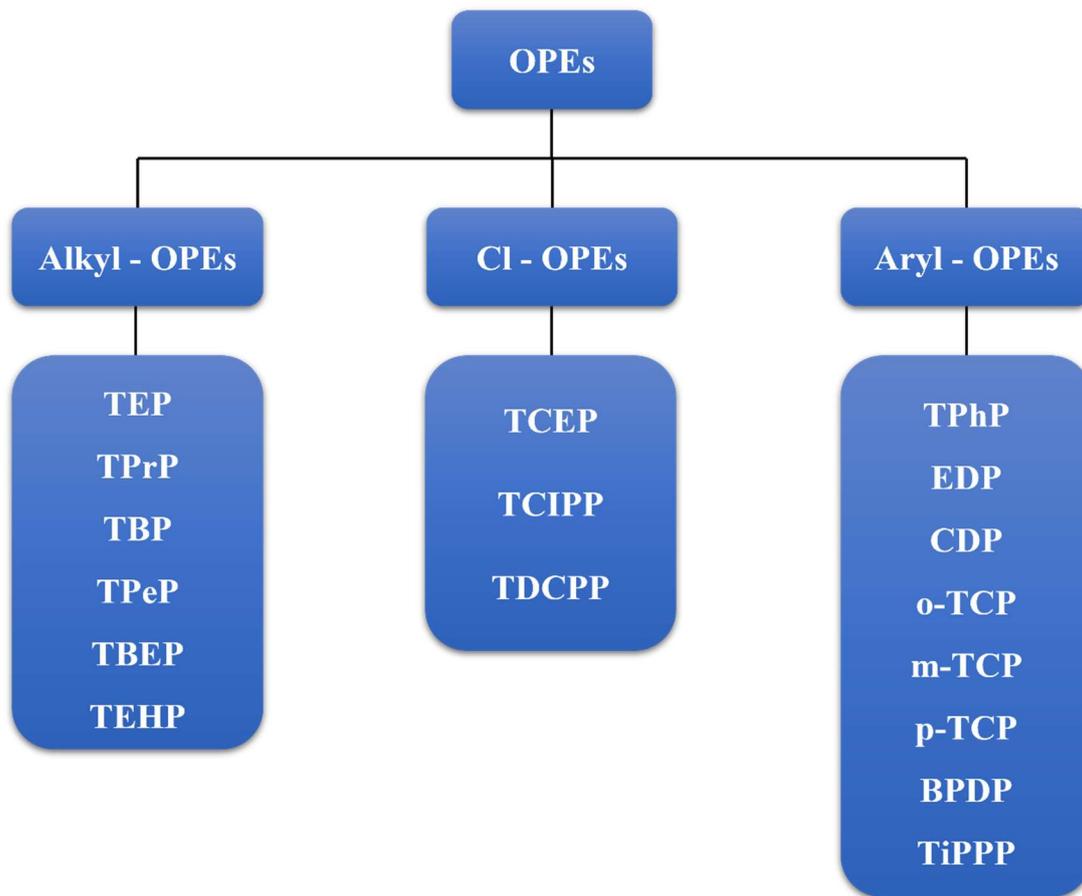
2.1 有機磷酸酯(Organophosphate esters, OPEs)

有機磷酸酯(OPEs)是以磷為中心原子的人造工業化學品，廣泛應用於電子、建材、紡織、食品、塑料等工業和家用產品，做為液壓油、發泡劑、阻燃劑、塑化劑、拋光劑添加劑和油漆等功能。有機磷酸酯(OPEs)具相同磷酸基化合物，化學結構中心以磷酸分子和異質取代基(圖 2 所示)，被認為是溴化阻燃劑(brominated flame retardants, BFRs)的合適替代品，尤其是 BFRs 受到斯德哥爾摩公約(Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants)，限制後，逐步淘汰多種多溴聯苯醚(polybrominated diphenyl ethers, PBDEs)同系物，OPEs 需求量呈現不斷增長。OPEs 以有機磷三酯(tri-OPEs)為主要形式，而三酯經過分解後得出的產物為有機磷二酯(di-OPEs)，其他形式則以多磷酸酯存在。而 OPEs 三酯根據取代基種類不同可分為氯化磷酸酯、烷基磷酸酯和芳基磷酸酯(圖 3 所示)，一般常見 OPEs 結構式如表 1 所示。其中氯化磷酸酯較為關注，主要用作阻燃劑，而非氯化磷酸酯主要作增塑劑和其他應用。近年 OPEs 的生產和使用量不斷增加，主要為 OPEs 在許多情況下可用作多溴聯苯醚(PBDEs)替代品。



資料來源：Wikipedia (<https://en.wikipedia.org/wiki/Organophosphate>)

圖 2 一般 OPEs 結構通式



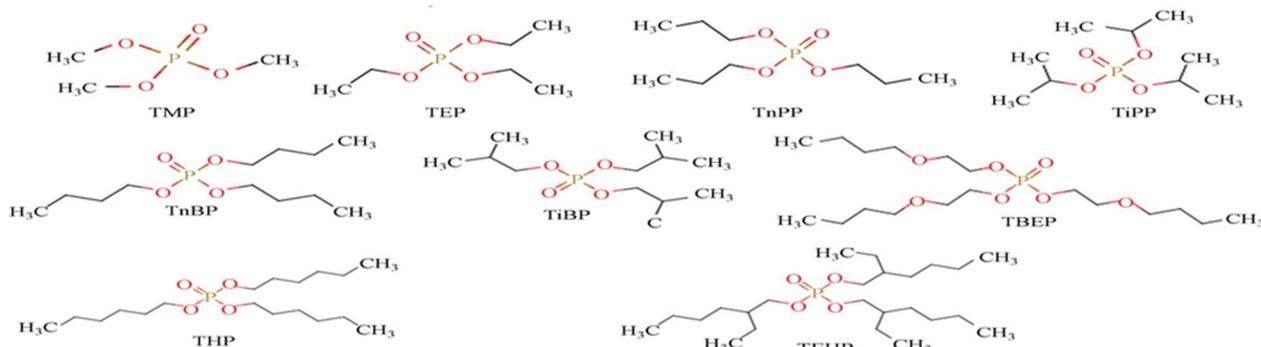
資料來源：Hu et al., 2021

圖 3 OPEs 分類

表 1 一般常見 OPEs 結構式

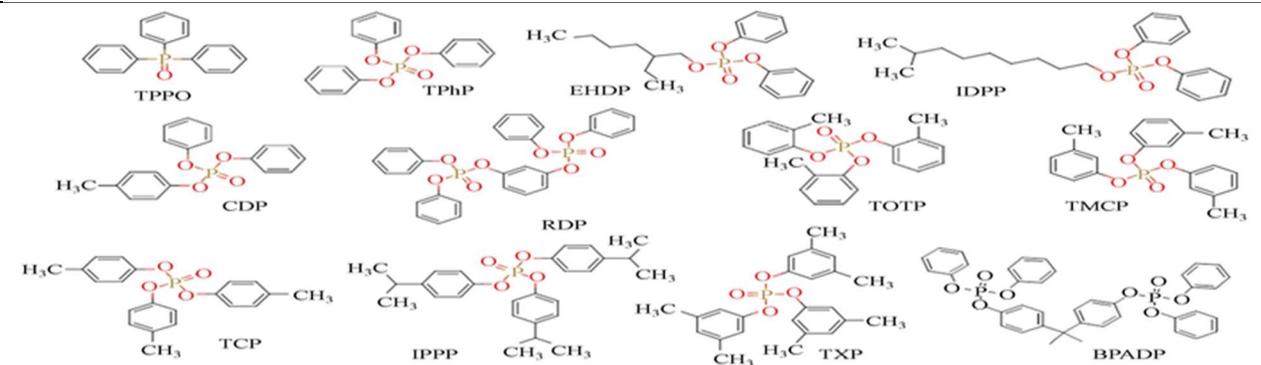
烷基 OPEs

Triethyl phosphate (TEP)、Tripropyl phosphate (TPrP)、Tributyl Phosphate (TBP)、tris(2-Butoxyethyl) Phosphate (TBEP)、tris(2-Ethylhexyl) Phosphate (TEHP)、Tricresyl phosphate (TCPs, including three isomers)、Triphenyl phosphate (TPeP)



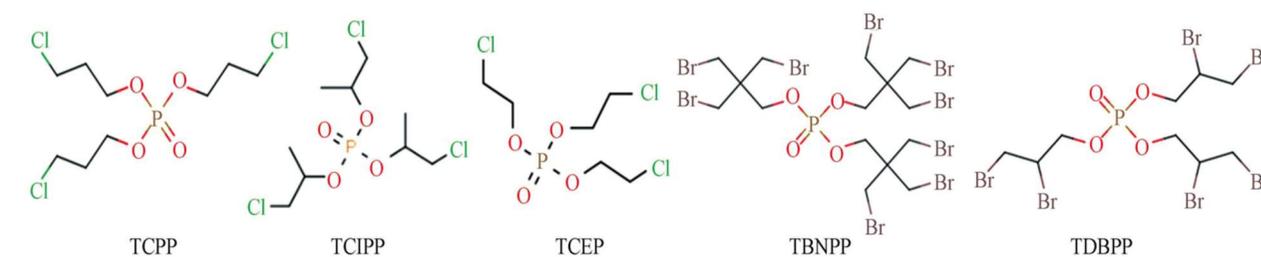
芳基 OPEs

Triphenyl Phosphate (TPhP)、2-Ethylhexyl diphenyl phosphate (EDP)、Cresyl Diphenyl Phosphate (CDP)、Bisphenol A bis(diphenyl phosphate)(BPDP)、tris(2-Isopropylphenyl) Phosphate (TiPPP)



氯化 OPEs

tris(2-Chloroethyl) Phosphate (TCEP)、tris(1-Chloro-2-propyl) Phosphate (TCPP)、Tri(Chloropropyl) Phosphate (TCIPP)、tris(1,3-Dichloro-2-propyl) phosphate (TDCPP)



資料來源：Wikipedia (<https://en.wikipedia.org/wiki/Organophosphate>) 本研究彙整

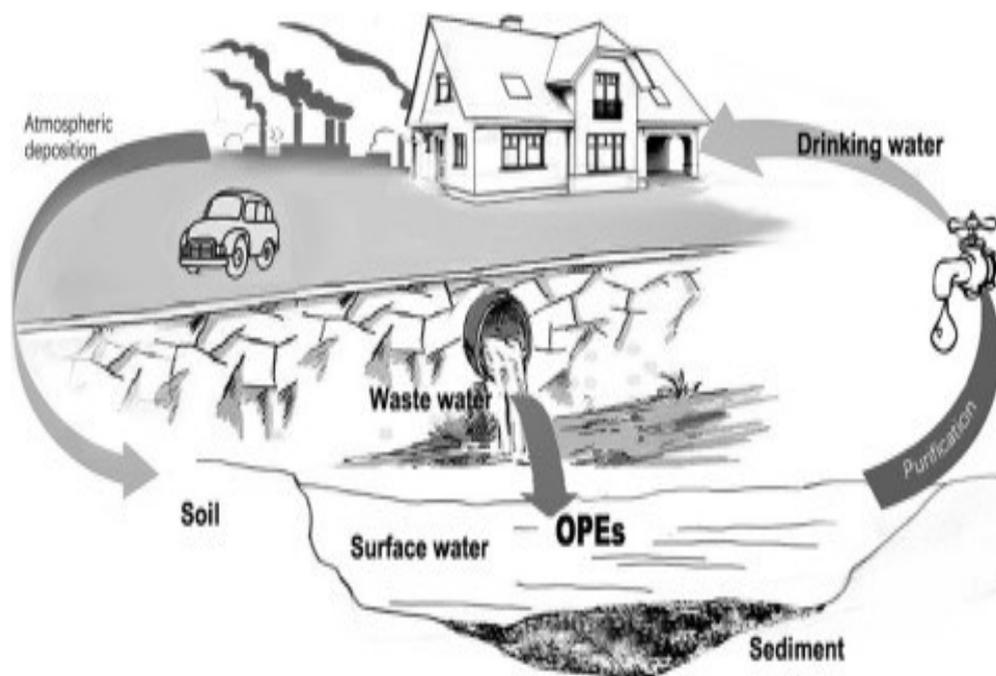
2.1.1 OPEs 特性及環境分布概況

有機磷酸酯(亦稱磷酸酯)為具通用結構 $O=P(OR)_3$ 的有機磷化合物，帶有烷基或芳香族取代基(芳基)中心磷酸鹽分子，因而認為磷酸的酯。有機磷酸酯以多種形式存在，包括許多重要生物分子，如生物體之去氧核糖核酸(deoxyribonucleic acid, DNA)、核糖核苷酸(ribonucleic acid, RNA)和三磷酸腺苷(adenosine triphosphate, ATP)及農藥(如殺蟲劑、除草劑等)。OPEs 因生產成本低，且可以物理方式添加至最終產品與多種聚合物相容，如紡織、家具和電子等產業之增塑劑和阻燃劑。OPEs 易透過揮發、淋溶和磨損等方式逸逸至大氣、粉塵、水體、沉積物、土壤和生物群等各種環境中。有機磷酸酯因種類繁多，具多種物理化學特性，自高極性到極耐水解。OPEs 的辛醇-水分配係數(log Kow)值廣泛，範圍為-0.98~10.6 間，具親脂性和親水性。OPEs 用作阻燃劑和增塑劑之 log Kow 值多為大於 1，即具親脂性，範圍介於 1.44~ 9.49，因其疏水特性，易對生態系中之生物造成生物累積(Bioaccumulation)和生物濃縮(Bioconcentration)，續透過食物鏈(food chain)逐級傳遞使濃度逐漸提高而形成生物放大作用(Biomagnification)。

環境中的 OPEs 由於其潛在的致癌性、神經毒性、發育和生殖毒性及代謝抑制等可能對人類健康構成威脅(Luo et al., 2020)。氯化 OPEs(如 TCPP)因可抗日光降解，被認為具潛在致癌性，並可能在人體肝臟和腎臟中累積(Li et al., 2017)。OPEs 目前已被廣泛應用在數千種工業和民生消費品，隨著這些產品使用和生產增加，在整個生命週期(包括生產、使用、運輸等)中排放到不同的環境區域，尤其是淡水和海洋環境中(Wei et al., 2015)。其中各類污水排放和固體廢物(尤其是廢棄電子產品)處理廠是釋放 OPEs 至環境中的重要貢獻源，如圖 5

所示。(Wang et al., 2020)

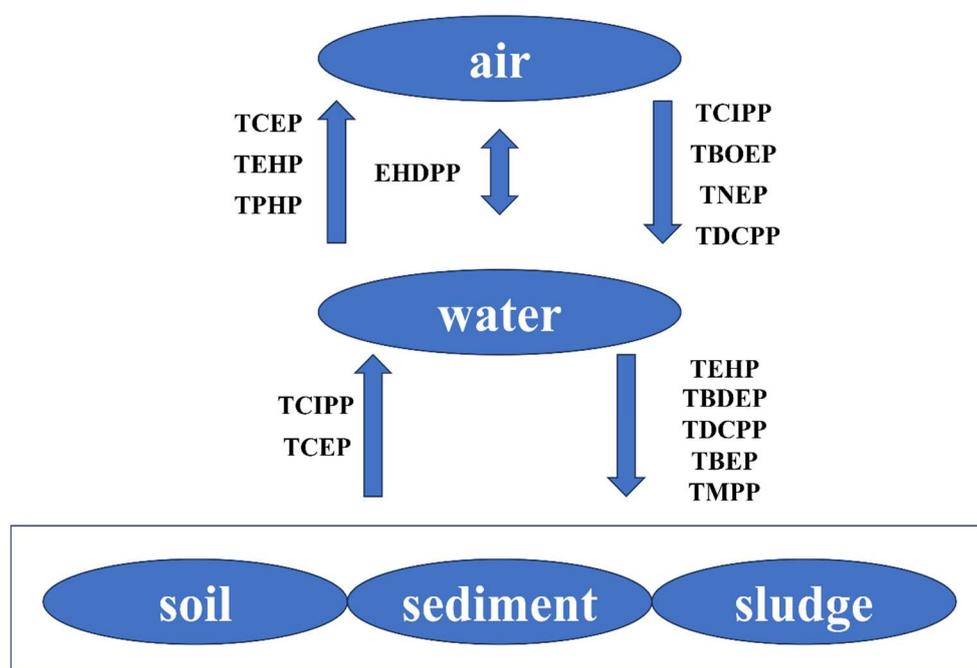
在世界各國地表水中幾乎都可發現 OPEs 存在。早期對 OPEs 的研究調查結果，在德國幾條河川中 OPEs 濃度範圍為 17~1,510 ng L⁻¹ (Fries and Puttmann, 2001)。另在美國、德國、奧地利、意大利、西班牙、韓國和日本的進一步研究結果，顯示 OPEs 平均濃度介於 76~2230 ng L⁻¹，其中 TBOEP、TNBP 和氯化 OPEs 為主要的貢獻物種(Wei et al., 2015)，各種研究結果凸顯 OPEs 在全球環境流佈重要性。近年對 OPEs 於環境中的各種研究逐漸增加，並陸續有研究結果指出新興化合物對環境生態與人體健康造成的危害與影響。然而目前臺灣針對河川 OPEs 濃度之研究並不多。OPEs 在建築、車輛、電子和塑料等廣泛應用，推測 OPEs 在都市中的消耗需求量呈現增加，尤以人口密集的都會區，其地表水體易受 OPEs 的嚴重污染。本研究即針對淡水河海口之 OPEs 濃度進行調查分析，並探討季節變化對 OPEs 濃度之影響。



資料來源：Wang et al., 2020

圖 4 有機磷酸酯於環境中之分布

水體和空氣中的 OPEs 濃度係透過空氣-水氣態交換和乾/濕沉降達到平衡，如透過計算淨空氣-水交換通量獲得 OPEs 的結果表明，TCIPP 和 TBOEP 主要是從大氣沉降到水中，除 TCEP 外，TEHP 次之，TPHP 主要從水蒸發到空氣中。TNBP 和 TDCIPP 主要從空氣沉降到水中，而 EHDPP 透過逸散係數(fugacity fraction, ff)達到空氣和水之間的平衡，OPEs 也可能源自長距離運輸，然後透過乾/濕沉降進入水環境(Hu et al., 2021)，一般常見有機磷酸酯(OPEs)在各種環境中的途徑如圖 5 所示。



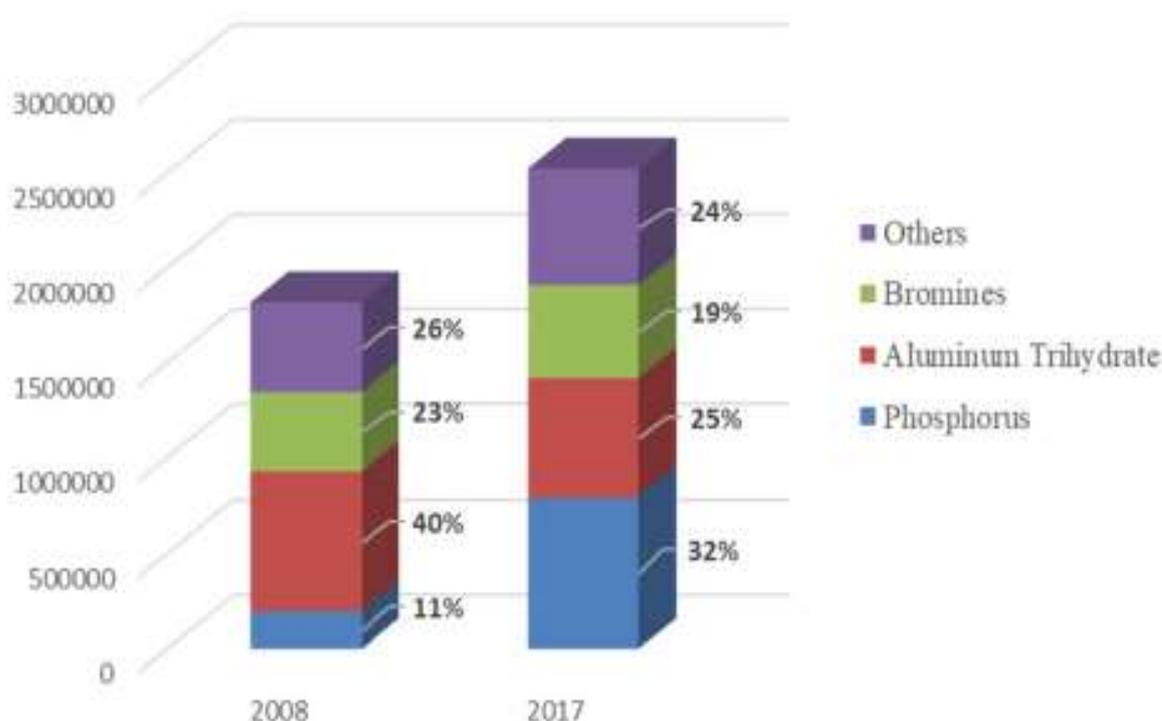
資料來源：Hu et al., 2021

圖 5 常見有機磷酸酯(OPEs)在各種環境中的途徑

OPEs 在食品、飲用水和人類環境中普遍存在，其多樣毒性使它們易透過多種暴露途徑對人類健康構成潛在威脅，包括飲食攝入、皮膚接觸、粉塵攝入和空氣吸入(Hou et al., 2021)，另有研究已經報導了人類母乳、血清、頭髮、尿液、指甲和胎盤中 OPEs(He et al., 2018)。因此，它們成為環境和人類健康的新問題。因此，重要的是深入研究 OPEs 的特性、生產/使用、環境水平、毒性和人體暴露風險。

2.1.2 OPEs 生產和使用

由於多溴二苯醚等溴化阻燃劑(BFRs)的使用受到限制，近年來 OPFRs 已成為第一大阻燃劑(Quintana et al., 2007)。如圖 6 所示，2017 年全球阻燃劑消費量為 253 萬噸，其中磷系阻燃劑佔 30%以上，溴系阻燃劑佔 20%，這與十年前的情況有些不同；當時磷系阻燃劑的消費量佔阻燃劑總消費量的 11%，而溴系阻燃劑佔總消費量的 23%。

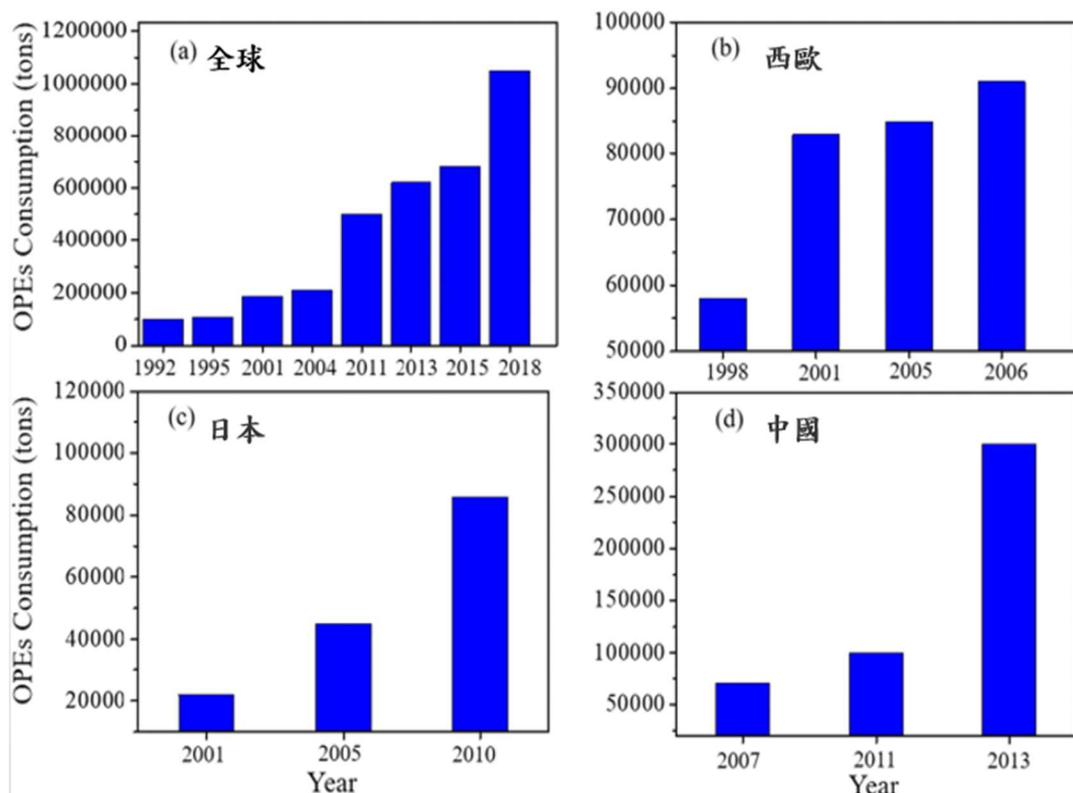


資料來源：Wang et al., 2020

圖 6 2008 年和 2017 年全球阻燃劑消費量(噸)

最近的數據估計 2018 年將達到 1,05 萬噸/年(圖 7a)。這種增長主要來自日本、中國和西歐等多個國家 OPEs 使用量的增加(圖 7)。在西歐，OPEs 是高產量化學品之一，其作為阻燃劑的使用量從 1998 年的 58,000 噸/年急劇增加到 2001 年的 83,000 噸/年。它從 2005 年的 85,000 噸/年攀升到 2006 年的 91,000 噸/年，這可能是這是因為 OPEs 經常被用作阻燃劑、增塑劑、消泡劑和 PBDE 的替代品(圖 7b)。另一方面，在日本(圖 7c)，從 2001 年到 2005 年，OPEs 的總使用量從 22,000 噸

/年增加到 45,000 噸/年，2010 年消耗約 87,500 噸等。2007 年中國(圖 7d)OPEs 消費量為 7 萬噸，2011 年增加至 10 萬噸，2013 年消費量約為 30 萬噸，預計每年增 15%左右(Bekele et al., 2021)。



資料來源：Wang et al., 2020

圖 7 不同地區有機磷酸酯阻燃劑和增塑劑的消費量

多數 OPEs 被歸類為阻燃劑或塑化劑。然仍有其它多種應用，包括地板拋光劑的添加劑和地板拋光劑、液壓油、噴漆和潤滑劑中的消泡劑及其他應用。OPEs 被用作多種材料的添加劑，包括紡織品和家具以及車用產業和電子元件、橡膠、聚氨酯泡棉、聚氯乙烯(PVC)塑料和建築材料。其他使用 OPEs 的材料包括棉花和纖維素、膠水、環氧樹脂和酚醛樹脂(Andresen et al., 2004)。

OPEs 通常透過物理加成而不是化學鍵合進入材料，也因為 OPEs 不會與產品發生化學結合的特性，因此會蒸發或風化到環境周圍，包括在空氣中、灰塵、土壤以及水，都有可能存在 OPEs 的存在，然而人

類可透過吸入、皮膚接觸和攝入接觸到 OPEs，因此在過去十年中，越來越多研究表示接觸 OPEs 與很多健康影響有關，因為 OPEs 污染物有許多不同種類的化合物結構，所以影響的層面包含癌症和細胞毒性以及神經和內分泌疾病，根據使用的取代基種類不同，OPEs 主要可分為烷基、氯化和芳基三大類，而其中常見的 OPEs 就有幾十種，所以要檢測這些污染物時，也需要根據不同的性質去做分析(Lv et al., 2022)。

2.1.3 全球河川中有機磷酸酯(OPEs)研究

表 2 為全球地表水中檢測到範圍廣泛的 OPEs 水平。這證明了 OPEs 的普遍存在，化合物濃度從幾十到幾千 ng/L 不等，其中 TCPP、TBEP、TCEP 和 TBP 是主要的 OPEs。

圖 8 為中國對北方 40 條入海河川水體 12 種有機磷化合物組成，其中 TCPP、TCEP 和 TPPO(一種合成中間體 synthetic intermediate)是含量最豐富的有機磷化合物，其濃度百分比組成([TCPP]+[TCEP]+[TDCPP])佔總量 66.2%~99.7%，平均 91.1%。僅考慮 OPEs 時，各河流中 TCPP 和 TCEP 含量最豐富，其濃度百分比組成之和([TCPP]+[TCEP])範圍為 65.8%~99.2%，平均為 89.3%(Wang et al., 2015)。這一行為與珠江的研究結果一致(Wang et al., 2014a)。這可能歸因於 TCPP 和 TCEP 是氯化磷酸酯的兩種最常見的產物，並且它們似乎是水中最難溶解的(Reemtsma et al., 2008)。TDCPP、TiBP、TBP、TBEP 和 THP 的中間濃度可能反映了該族污染物在受人為壓力影響的河流中的廣泛分佈。相比之下，TPeP、TEHP、TPP 和 TCP 在大多數河流中檢測到的濃度最低或未檢測到。這些 OPEs 的不同模式可能歸因於它們的物理化學性質的差異以及由此產生的影響積累特徵和降解性的差異以及生產和就業方面的差異。

表 2 全球河川中的有機磷酸酯(OPEs)研究與比較

River	Location	TCPP	TCEP	TDCPP	TiBP	TBP	TBEP	TPP	TPPO	Ref.
40 條河流	華北地區	5-921	1-268	<LOD-44	<LOD-218	<LOD-81	<LOD-47	<LOD-16	<LOD-5852	(Wang et al., 2015)
珠江口	華南地區	150-1150	220-1160	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	(Wang et al., 2014b)
松花江	中國東北	5-190	38-3700	2-46	n.a.	87-960	5-310	5-65	n.a.	(Wang et al., 2011)
易北河	德國	40-250	5-20	n.a.	10-50	2-8	<LOD-80	<LOD-4	10-40	(Bollmann et al., 2012)
萊茵河	德國	75-160	12-25	n.a.	17-84	6-28	28-54	1-2	n.a.	(Bollmann et al., 2012)
4 條溪流	德國	<LOD-2914	<LOD-557	<LOD-1284	n.a.	<LOD-3889	<LOD-1773	n.a.	n.a.	(Quednow and Püttmann, 2008)
艾爾	英國	113-26,050	119-316	62-149	n.a.	n.a.	n.a.	6-22	n.a.	(Cristale et al., 2013c)
艾爾	英國	4821	181	49	n.a.	n.a.	n.a.	17	n.a.	(Cristale et al., 2013b)
納瓦拉、阿斯圖里亞斯、加泰羅尼亞	西班牙	<LOD-1800	<LOD-330	<LOD-200	<LOD-1200	<LOD-370	<LOD-4600	<LOD-18	n.a.	(Cristale et al., 2013a)
三條河流	奧地利	33-170	13-130	<LOD-19	n.a.	20-110	24-500	<LOD-10	n.a.	(Martínez-Carballo et al., 2007)
三大河流	韓國	n.a.	42	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	(Kim et al., 2007)
阿肯色州溪流	美國	n.a.	48-700	n.a.	n.a.	31-560	n.a.	n.a.	n.a.	(Haggard et al., 2006)

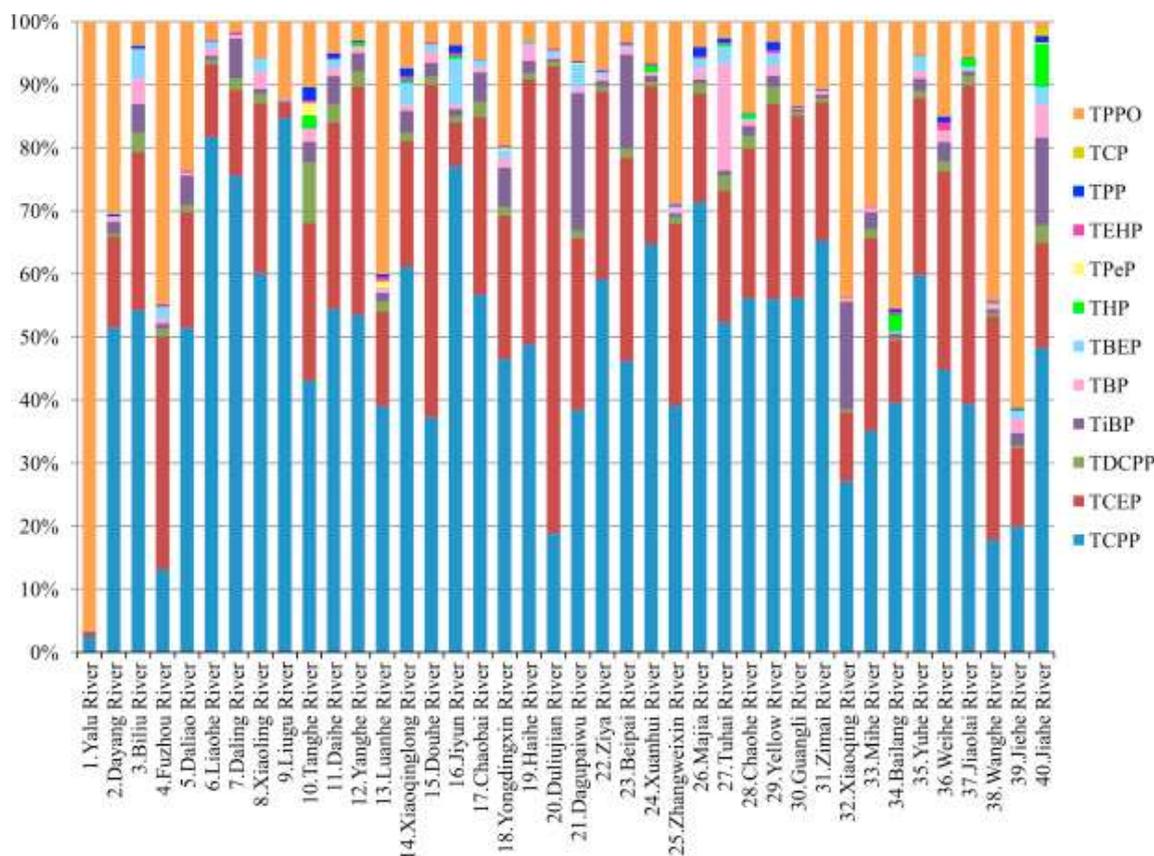


圖 8 中國北方 40 條河流中 12 種 OPFR 濃度百分比組成

在一篇越南河內市區河流和湖泊地表水中有機磷酸酯的存在及生態風險評估的研究中，選取 6 種 OPEs(TCEP、TCPP、TDCPP、TBEP、TPhP、TnBP)用於評估水生生物的生態風險，其中生物包含(a)藻類和綠藻類(b)甲殼類動物；豐年蝦、水蚤、斑馬魚(c)魚群和金魚，結果如表 3 所示，三個生物群的 TCEP、TCPP、TDCPP、TBEP 和 TnBP 的 RQ 均低於 0.1，最高 RQ 值分別為 0.00142、0.09351、0.04267、0.00122 和 0.03655。這些結果表明，這 5 種 OPEs 對河內水生環境中三個生物群中任何一個的威脅都是有限的，相反，在河內市區的許多湖泊和河流中觀察到 TPhP 相關的中等潛在影響($0.1 \leq RQ \leq 1.0$)。

在這項研究中，沒有觀察到河內湖泊和河流中與 TCEP、TCPP、TDCPP、TBEP 和 TnBP 相關的水生生物存在重大風險。然而，先前

的研究結果表明 OPEs 在生物群中具有生物蓄積性(Sundkvist et al., 2010)。因此，應對河流和湖泊生物群中 OPEs 進行更深入的研究，以更好地了解這些化合物在水生環境中的生物放大作用及其影響。

表 3 水生生物的風險商數(RQ) (Truong et al., 2023)

Risk quotiens (RQs) for the aquatic organism.

Compound	Species	L(E) C50 (mg/L)	PNEC (ng/L)	RQs
TCEP	Algae (<i>Scenedesmus subspicatus</i>)	51	51,000	0–0.00142
	Crustacean (<i>Daphnia magna</i>)	330	333,000	0–0.00022
	Fish (<i>Carassius auratus</i>)	90	90,000	0–0.00080
TCPP	Algae (<i>Scenedesmus subspicatus</i>)	45	45,000	0.00285–0.06234
	Crustacean (<i>Daphnia magna</i>)	91	91,000	0.00141–0.03083
	Fish (<i>Poecilia reticulata</i>)	30	30,000	0–0.09351
TDCPP	Algae (<i>Pseudokirchneriella subcapitata</i>)	39	39,000	0–0.00131
	Crustacean (<i>Daphnia magna</i>)	4.2	4200	0–0.01219
	Fish (<i>Oncorhynchus mykiss</i>)	1.2	1200	0–0.04267
	Fish (<i>Carassius auratus</i>)	5.1	5100	0–0.01004
TPhP	Algae (<i>Scenedesmus subspicatus</i>)	0.5	500	0–0.3057
	Crustacean (<i>Daphnia magna</i>)	1.1	1100	0–0.13895
	Fish (<i>Carassius auratus</i>)	0.7	700	0–0.21836
	Fish (<i>Oncorhynchus mykiss</i>)	0.42	420	0–0.36393
TBEP	Algae (<i>Scenedesmus subspicatus</i>)			
	Crustacean (<i>Daphnia magna</i>)	75	75,000	0–0.00122
TBP	Green algae (<i>Chlorella emersonii</i>)	10	10,000	0–0.00402
	Green algae (<i>Scenedesmus subspicatus</i>)	1.1	1100	0–0.03655
	Brine shrimp (<i>Artemia salina</i>)	54.6	54,600	0–0.00074
	Water flea (<i>Daphnia magna</i>)	2.1	2100	0–0.01914
	Zebra danio(<i>Danio rerio</i>)	11.4	11,400	0–0.00353
	Goldfish (<i>Carassius auratus</i>)	8.8	8800	0–0.00457

2.2 微塑膠(Microplastics, MPs)

依據各學術界普遍之定義，所謂微塑膠(Microplastics, MPs)一般為界於 1 μm -5 mm 的塑膠碎片，而若其中直徑小於 1 μm ，通常被稱為奈米微塑膠(Nanoplastics, NPs)，並且分為五種形狀類型：碎片(Fragment)、纖維(Fiber)、薄膜(Film)、發泡塑膠(Foam)和柔珠(Microbeads)。按照來源的不同，微塑膠可以區分為初級及次級。前者為製造和生產時加入產品中，小於 5mm 的塑膠纖維或顆粒，例如：油漆、粘合劑塗層、清潔劑和化妝品中的柔珠；後者則為塑膠垃圾經物理或化學作用(如太陽輻射、機械磨損、微生物作用等)下被老化、降解而形成之微塑膠，例如：棄置之塑膠製品和輪胎等(Rillig 2012, Surya Singh 2022)。

另一種分類是基於聚合物的類型，常見的微塑膠材質有六種，分別為：聚丙烯(PP)、聚乙烯(PE)、聚對苯二甲酸乙二酯(PET)、聚苯乙烯(PS)、聚氯乙烯(PVC)，以及俗稱尼龍的聚醯胺纖維(Nylon / PA)，大多用途為吸管、塑膠袋、塑膠餐具和人工合成纖維材料等塑膠製品(medpartner 2018)。現於廢水、食品、土壤、大氣、高山、淡水、海洋、飲用水(包括瓶裝水和自來水)、冰川乃至極地皆可檢測到它們的蹤跡。

來自河流和沿海地區的樣本中微塑膠水平較高。碎片和纖維是最常見的類型，碎片通常比纖維更豐富。微塑膠碎片可能源自與旅遊活動相關的塑膠處置物品，因為廢棄的塑膠會分解成更小的碎片(Andrady, 2017 ; Gaibor et al., 2020)，而纖維的存在可能與未經處理的廢水排放有關。纖維往往透過濁流傳輸 (Haddout et al., 2021)，並在存在懸浮固體的情況下透過下沉從懸浮液中去除。另一方面，碎片具有高浮力和低密度(Pohl et al., 2020)，並且可能比地表水中產生的纖維更豐富。

不同都市化程度的沿海地區微塑膠污染沒有顯著差異。在人口稠密地區附近的沿海地區或旅遊活動密集的地區也報告了微塑膠較高的污染。不同都市化水平地區的微塑膠污染之間沒有差異也可能是因為我們將採樣限制在地表水而不是沉積物中。水中的微塑膠污染更可能受到當地海洋條件的影響，而微塑膠往往會隨著時間的推移在沉積物中累積(Capparelli, 2021)。

一定數量的塑膠在進入海洋之前會碎裂成小碎片。特別是由於高污染密度和城市化的地區，微塑膠對河流環境的污染在水質較差的污染河流中進展最為嚴重。隨著水質下降，微塑膠濃度顯著增加，並且與 BOD、DO、TN 和 TP 有顯著關係(Kataoka, 2019)。微塑膠濃度的巨大時空變化是由於季節變化造成的，而季節變化取決於流域洪水和土地利用的滯後性(Borah and Bera, 2004)。

2.2.1 微塑膠來源

廢水處理廠、大型塑料破碎、固體廢物管理、水產養殖、農業、漁業、工業與家庭排水皆是微塑膠於環境中可能污染的來源，可能排放途徑如下(Maes, Van der Meulen et al. 2017，行政院環保署 2018)：

1. 逕流廢水。
2. 於塑膠製造、加工、運輸和回收過程中，顆粒直接掉落於環境中。
3. 工業或家庭中清洗合成衣物時的纖維磨損和脫落而產生之初級塑膠。
4. 因施工、維護和移除船用塗料而造成的風化。
5. 海運過程中直接散落至海洋。
6. 與其他廢棄物混合，或因不當棄置而被散佈至環境中。
7. 城市塵埃(如：合成鞋底等物體、人造草皮等基礎設施等)因風化、磨損而產生。

據估計，僅有約 9%的塑膠製品會被妥善處理，其餘大多未經處理即直接進入海洋 (Harris, Gill et al. 2021)。根據研究發現，在都市區域裡的工業、商業和住宅區，人類活動所產生微塑膠顆粒，可能透過雨水下水道沖入河流中，最終出海後污染海洋(Kunz, Schneider et al. 2023)。

2.2.2 微塑膠接觸人類途徑與危害

人體接觸或吸收微塑膠的途徑主要分為三種(Enyoh, Shafea et al. 2020)：

1. 飲食或飲水攝入：食用體內含有微塑膠的受污染的水生生物、動物或植物，飲用受微塑膠污染的水源。
2. 呼吸吸入：飄散在空氣中的微塑膠經由口鼻進入呼吸系統中，其他如建築材料、垃圾焚燒、交通工具也可能使微塑膠暴露。
3. 皮膚接觸：微塑膠可能會用於化妝品，例如沐浴露、去角質劑和牙膏等。

皮膚接觸被認為是一種不太重要的暴露途徑，根據德國聯邦風險評估研究所(German Federal Institute for Risk Assessment)的報告，這些添加於化妝品中之塑膠顆粒的尺寸通常都遠大於 1 μm ，在正常使用狀況下，微塑膠是不太可能穿透健康且完整的皮膚進到體內(The German Federal Institute for Risk Assessment 2019)。與微塑膠相關的潛在危害有三種形式：具有物理危害的顆粒本身、化學物質(未結合的單體、添加劑和從環境中吸收的化學物質)以及可能附著和定殖在微塑膠上的微生物，又稱為生物膜，可能使致病微生物成為這種生物膜的一部分(Geneva:World Health Organization 2019)。

於顯微鏡觀察下，微塑膠具有相對較大的表面積、親脂性(疏水性)和表面有眾多的坑洞，易吸附微生物、有機污染物及環境賀爾蒙，

例如：病原體、持久性有機污染物(POPs)、多環芳香烴(PAHs)、多氯聯苯、雙酚 A、多溴二苯醚、雙對氯苯基三氯乙烷(DDT)、戴奧辛和壬基酚(Athapaththu, Thushari et al. 2020, Chen, Ju et al. 2020)。

維也納醫科大學(Medical University of Vienna)挑選 8 個不同國家的成人糞便並研究其內容物，發現全數樣本皆含有微塑膠，其中聚對苯二甲酸乙二酯(PET)和聚丙烯(PP)含量最高，通常被廣泛使用於蔬果包裝、寶特瓶等食品包裝(綠色和平塑膠專案小組 2020)。

參、研究材料與方法

3.1 採樣規劃

淡水河主要由大漢溪、新店溪及基隆河三條河川匯集而成，河川總長度為 159 公里，流域面積達 2,726 平方公里，為北部第一大河川，臺灣第三大河川。

本研究規劃於淡水河中下游與河口段，分別設置五個採樣點位 (TS0-TS4)，如圖 9、10 所示，其中 TS0 採樣點位於淡水河最上游區；TS1 採樣點位於中游位置，為淡水河中大漢溪河段位置；TS2 採樣點位於淡水河中下游區，為新店溪河段匯入淡水河後之位置；TS3 採樣點位於淡水河中下游區，為新店溪河段匯入淡水河後之位置；TS3 採樣點則位於淡水河下游區，為基隆河匯入後之位置；TS4 採樣點位在淡水河下游出海口位置。由此採樣點位之規劃，可以進一步瞭解新興污染物於淡水河整體濃度變化與通量。

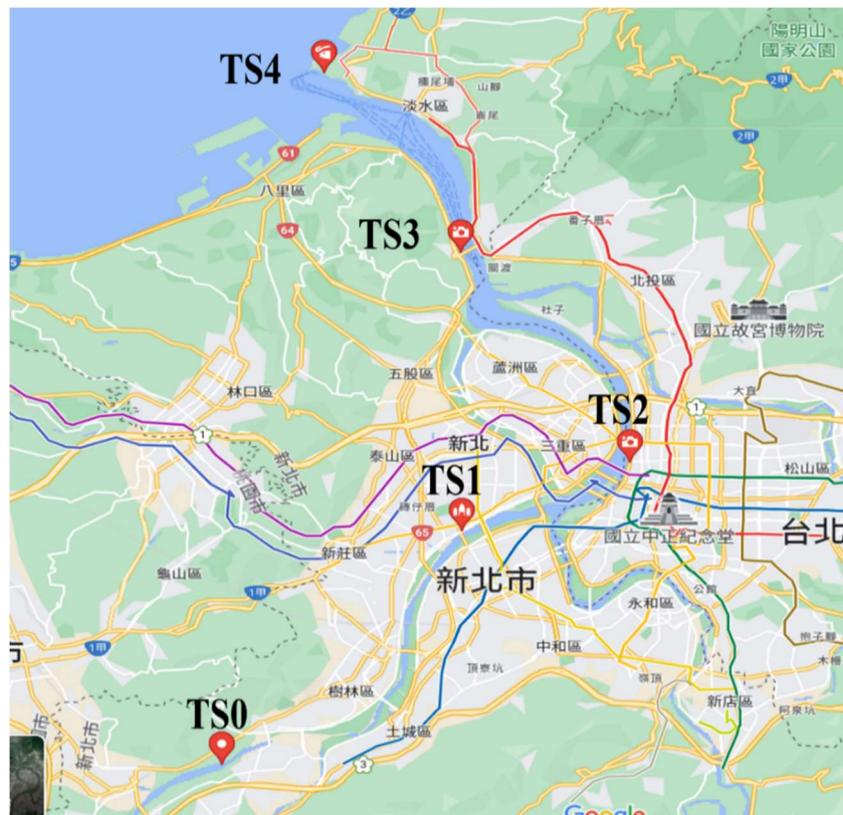


圖 9 本研究採樣點位



圖 10 本研究採樣點位

3.2 材料與儀器

3.2.1 實驗材料

一. 有機磷酸酯(Organophosphate esters, OPEs)

(一) 玻璃纖維濾紙 (0.7 μm , 47 mm, Whatman)

(二) 去離子水：ELGAReservoir25Lwater purification systems 製造之去離子水

(三) 乙酸乙酯(ethyl acetate)殘量級

(四) 二氯甲烷(dichloromethane)殘量級

(五) 正己烷(n-hexane)殘量級

(六) 丙酮(acetone)殘量級

(七) 標準品/內標準品

1. TEP-d15

2. TPrP-d21

3. TBP-d21

4. TCEP-d12
5. TDCPP-d15
6. TPP-d15
7. TBEP-C13

(八) OPEs 分析物種：

1. Triethyl phosphate (TEP)
2. Tripropyl phosphate (TPrP)
3. Tributyl Phosphate (TBP)
4. tris(2-Chloroethyl) Phosphate (TCEP)
5. tris(1-Chloro-2-propyl) Phosphate (TCPP)
6. Tri (Chloropropyl)Phosphate (TCIPP)
7. Tripentyl phosphate (TPeP)Standard (TPeP)
8. tris(1,3-Dichloro-2-propyl) phosphate (TDCPP)
9. tris(2-Butoxyethyl) Phosphate (TBEP)
10. Triphenyl Phosphate (TPhP)
11. 2-Ethylhexyl diphenyl phosphate (EDP)
12. tris(2-Ethylhexyl) Phosphate (TEHP)
13. Cresyl Diphenyl Phosphate (CDP)
14. Tri-o-cresyl Phosphate(o-TCP)
15. Tri-m-cresyl Phosphate (m-TCP)
16. Tricresyl phosphate (mixture of isomers) (TCP)
17. Bisphenol Abis (diphenyl phosphate) (BPDP)
18. Tri-p-cresyl Phosphate(p-TCP)
19. tris(2-Isopropylphenyl) Phosphate (TiPPP)
20. Isodecyl Diphenyl Phosphate (IDDP)
21. Trimethyl Phosphate (TMP)
22. tris(2-Chloropropyl)Phosphate (TCIPP 同源物)

二. 微塑膠(Microplastics, MPs)

(一)去離子水：ELGA Reservoir 25L water purification systems 製造

(二)之去離子水

(三)過氧化氫(Hydrogen peroxide)：30%, Honeywell, U.S.A

(四)氯化鈉(Sodium chloride)：≤100%, Honeywell, U.S.A

(五)不鏽鋼濾膜：30mm, 47μm, Circle

(六)不鏽鋼濾膜：30mm, 25μm, Circle

(七)離心管(Centrifuge Tube)：50ml, Jet Biofol, China

3.2.2 分析儀器

一. 有機磷酸酯(Organophosphate esters, OPEs)

(一) 水流抽氣幫浦(ASPIRATOR, AS-3S)

(二) 索式萃取裝置

(三) 試管震盪器(Spire Mixer, 5100)

(四) 固相萃取裝置

(五) 固相萃取管匣(膜)(OASIS HLB cartridges 200 mg, 6 mL; Waters, Milford, MA)

(六) 氮氣吹乾裝置(N₂ Evaporator)

(七) 氣相層析串聯式質譜儀(GC/MS-MS)：(GCMS-TQ8050NX)

(八) GC-MS 自動注射系統(Auto-sampler 7683 series)

二. 微塑膠(Microplastics, MPs)

(一) 水流抽氣幫浦(ASPIRATOR, AS-3S)

(二) 震盪培養基

(三) 桌上型離心機(KUBOTA-5200)

(四) 烘箱(DENG YUG, DO45)

(五) 生物顯微鏡(OLYMPUS, CX31)

(六) 傅立葉轉換紅外線光譜儀(PerKin Elmer, Spotlight 200i)

3.3 樣品前處理

樣品將根據前處理與分析之時間進行採樣。採樣頻率預計每兩個月採集水樣一次，水樣體積每次採取 2L，分別收集 6 次之水樣，藉此探討此研究區域整體新興污染物時間與空間變化之趨勢。

3.3.1 OPEs 樣品前處理

分析流程如圖 11 所示，水樣透過玻璃纖維濾紙(glass fiber filters, 0.7 μ m, 47mm, Whatman)過濾以分離總懸浮固體(TSS)，並進行固相萃取以確定 OPEs 的溶解部分。首先，在萃取之前，在樣品中加入替代標準品(TBP-D21、TDCPP-D15 和 TPP-D15)，然後使用二氯甲烷透過 OASIS HLB 柱(200mg, 6mL；Waters, Milford, MA)進行 SPE 萃取。在顆粒相的部分，將過濾後的濾紙放進烘箱乾燥，並測量過濾的前後重量，隨後將濾紙浸泡在 50mL 的二氯甲烷：乙酸乙酯(1:1)混合溶液中進行超音波震盪萃取，然後將萃取後的溶液加入替代標準品，並進行真空減壓濃縮至 50 元硬幣大小，接著使用二氯甲烷透過 OASIS HLB 柱(200mg, 6mL, Waters, Milford, MA)同樣進行 SPE 萃取。在所有情況下，沖提液在溫和的 N₂ 氣流下蒸發至乾，最後使用 0.5mL 乙酸乙酯：正己烷(1:1)的混合物進行回溶，並使用氣相層析串聯式質譜儀(GC/MS-MS)來進行分析。

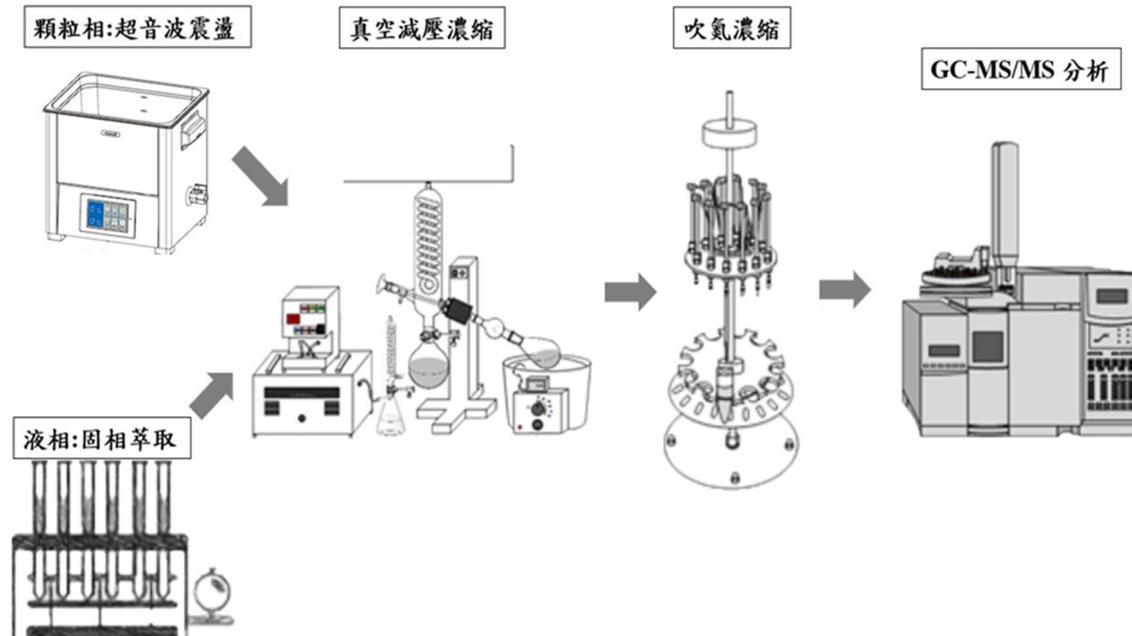


圖 11 採樣前處理流程

3.3.2 MPs 樣品前處理

水樣透過不銹鋼濾紙(30mm, 47 μ m, Circle)藉由水流抽氣幫浦進行過濾，過濾完成後，以去離子水大量沖洗過濾設備，將殘留物(微塑膠、有機物與無機物)完全留在濾紙上，接著放置濾紙於玻璃培養皿內並放入 50°C 的烘箱中烘乾 24 小時，而後續兩次烘乾皆相同溫度和時間。

將濾紙於烘箱內取出後，使用不銹鋼鐵勺刮除濾紙上的殘留物到 50 mL 燒杯，在常溫下加入 30% H₂O₂ 和置於震盪培養機 24 小時，進行消化有機物。在攪拌的同時，需使用鋁箔紙覆蓋燒杯口，避免空氣中的懸浮物質進入燒杯，而影響數據。後續使用不銹鋼濾膜(30mm, 25 μ m, Circle)和水流抽氣幫浦抽氣過濾，並以去離子水沖洗濾紙，再次放入烘箱中烘乾。烘乾完成後，濾紙上的殘留物利用不銹鋼鐵勺刮除至 50 mL 離心管內，並添加飽和氯化鈉(NaCl, 1.20g/mL)水溶液至刻度 30 mL。隨後將離心管放入桌上型離心機，以 2500 rpm 離心 10 分鐘兩次，主要用意為微塑膠與無機物分離。離心完成後，吸取密度

分離後之上澄液，再次進行抽氣過濾，而使用的材料與設備相同，過程中需大量去離子水沖洗，以確保濾膜上無飽和氯化鈉水溶液之殘留，避免往後濾紙上可能有氯化鈉結晶體之產生，再次進行烘乾。

殘留於不銹鋼濾膜上的微塑膠利用生物顯微鏡以目視之方式進行特徵分析與使用傅立葉轉換紅外線光譜儀分析其成分。

3.4 方法回收率

為了增加實驗數據的可信度，在實驗過程中於每個樣品裡加入已知濃度的同位素標準品，並計算實驗過程之回收率，以判斷實驗過程中樣品是否有損失。實驗中添加的擬似標準品為 TBP-d21、TPP-d15、TDCPP-d15，其計畫中 TBP-d21 的回收率為 62%，TPP-d15 的回收率則是 88%，而 TDCPP-d15 的回收率是 114%。

3.5 實驗空白分析

為避免樣本在實驗過程中受污染，導致分析結果受影響，本研究進行實驗過程中，每兩批實驗即進行一次空白分析，以檢驗實驗過程中樣本是否受干擾或污染。本研究使用 600 mL Milli-Q 去離子水，經相同實驗流程進行空白樣本分析。

3.6 風險評估

生態風險商數(Risk quotient, RQ)為環境中曝露濃度值與標準估計值之比值的生態風險評估，將測得之環境濃度(Measured environmental concentration, MEC)和對生物造成預期無效應濃度影響水平(Predicted no effect concentration, PNEC)，如: LC50 (50%生物死亡的農藥濃度)等預期無效濃度進行比較；計算 MEC/PNEC 之比值大於 1，代表該污染物對環境有影響(USEPA, 2017)。

透過計算 CECs 之風險商數，判斷該地區之潛在風險，計算公式

如下：

$$RQ = \frac{MEC}{PNEC}$$

MEC 值為測得的最大空氣濃度，PNEC 為測得的無效應濃度，當 RQ 值 < 1 為可承受風險，RQ 值 > 1.0 代表不可承受之風險。

肆、結果與討論

4.1 OPEs

4.1.1 OPEs 濃度分布

本研究目的之一在調查淡水海口與周邊海域之水中 OPEs 濃度之變化。在觀光地區所設置採樣點包含淡水漁人碼頭與大稻埕碼頭，當地工業區所設置採樣點，則包含關渡橋頭八里自行車道附近的遊艇業之採樣點，以及人口密集的淡水河上游處大漢溪之採樣點。

四月、五月、七月、八月、九月和十月各採樣點數據結果如表 4、5、6、7、8、9 所示。四月樣品中總 OPEs 濃度(顆粒相+溶解相)範圍為 1.41–1761.30 ng/L 之間。由圖 12、13、14、15、16、17 可看出所有採樣點皆以溶解相 OPEs 高出許多，其中顆粒相 OPEs 濃度範圍為 0.83–109.1 ng/L，平均濃度為 7.51 ± 16.26 ng/L，溶解相 OPEs 濃度範圍為 0.38–1652.2 ng/L，平均濃度為 77.86 ± 319.85 ng/L，在八、九、十月中的樣品同樣以溶解相為主要污染物來源。溶解相 OPEs 濃度在四、五月以 TS4 淡水漁人碼頭採樣點為最低，顆粒相則是以 TS0 上游地區為最低，而在總 OPEs 濃度 (顆粒相+溶解相)當中，漁人碼頭測量到的 OPEs 濃度皆低於其他測站，主要原因可能是因為下游靠近出海口，導致測量到的 OPEs 濃度較低，這與其他研究的實驗結果相符合，而七、八、九月中 TS4 的 OPEs 濃度反而高出許多，可能原因有因台灣在夏季常有颱風影響，下雨導致污染物沖刷到了下游，另外可能原因是這些季節人潮較多，人類活動導致污染物的提升。

表 4 四月各採樣測站 OPEs 濃度

(ng/m³)

OPEs	TS0		TS1		TS2		TS3		TS4	
	顆粒相	溶解相	顆粒相	溶解相	顆粒相	溶解相	顆粒相	溶解相	顆粒相	溶解相
TEP	1.62	ND	1.96	ND	1.51	ND	1.60	ND	1.43	ND
TPrP	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
TBP	0.96	2.39	ND	4.84	ND	2.46	ND	3.15	ND	2.16
TCEP	7.36	ND	2.34	1.14	1.37	ND	1.51	1.05	ND	1.03
TCIPP	177.80	10.12	1652.16	109.13	1064.77	28.06	1581.99	21.80	8.52	9.28
TPeP	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
TDCPP	25.28	ND	8.75	ND	3.13	ND	5.07	ND	1.13	2.00
TBEP	13.38	4.56	7.44	7.97	17.51	6.35	11.81	10.69	9.99	13.86
TPhP	1.06	0.93	1.35	3.40	1.15	0.83	0.93	1.86	0.38	1.64
EDP	0.57	1.46	1.39	45.56	0.91	11.72	1.29	10.78	0.60	23.21
TEHP	4.12	4.79	8.17	9.35	10.46	8.35	2.48	9.99	1.73	2.80
CDP	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
o-TCP	1.78	ND	ND	1.25	0.85	1.16	ND	1.68	ND	ND
m-TCP	1.25	1.25	1.28	1.43	1.25	1.34	1.34	1.32	1.24	1.31
p-TCP	1.42	1.40	1.43	1.41	1.40	1.47	1.43	1.41	1.40	1.41
BPDP	1.26	1.26	1.26	1.27	1.26	1.28	1.26	1.30	1.25	1.29
TiPPP	0.73	ND	ND	1.11	0.64	ND	ND	1.32	0.90	ND
Σ17OPEs	238.6	28.2	1687.6	187.9	1106.2	63	1610.7	66.4	28.6	60

表 5 五月各採樣測站 OPEs 濃度

(ng/m³)

OPEs	TS0		TS1		TS2		TS3		TS4	
	顆粒相	溶解相	顆粒相	溶解相	顆粒相	溶解相	顆粒相	溶解相	顆粒相	溶解相
TEP	ND	9.63	ND	8.78	ND	15.61	ND	1.58	ND	1.99
TPrP	ND	0.31	ND	ND	ND	0.42	ND	ND	ND	ND
TBP	2.99	10.10	1.43	3.03	1.88	6.60	2.12	1.59	2.52	1.32
TCEP	ND	8.40	ND	3.89	ND	4.26	ND	1.30	ND	ND
TCIPP	4.80	93.84	2.27	58.69	1.89	32.36	2.40	12.74	1.89	4.55
TPeP	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
TDCPP	ND	11.45	ND	8.06	ND	6.26	ND	3.50	ND	0.51
TBEP	ND	1.64	ND	1.37	0.84	1.34	ND	ND	ND	ND
TPhP	ND	0.54	ND	0.31	0.28	0.24	ND	ND	ND	ND
EDP	1.87	0.52	28.29	0.39	16.57	0.26	19.50	0.22	16.63	0.19
TEHP	4.69	6.01	7.64	5.08	3.90	4.07	5.02	1.30	2.90	0.59
CDP	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
o-TCP	ND	ND	0.48	ND	0.68	ND	0.47	ND	ND	ND
m-TCP	1.04	0.60	0.69	0.65	0.60	0.63	0.65	0.59	0.60	0.60
p-TCP	0.46	0.41	0.43	0.41	0.42	0.43	0.43	0.41	0.41	0.41
BPDP	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
TiPPP	ND	0.34	ND	1.01	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Σ17OPEs	15.9	143.8	41.2	91.7	27.1	72.5	30.6	23.2	25	10.2

表 6 七月各採樣測站 OPEs 濃度

(ng/m³)

OPEs	TS1		TS2		TS3		TS4	
	顆粒相	溶解相	顆粒相	溶解相	顆粒相	溶解相	顆粒相	溶解相
TEP	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
TPrP	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
TBP	3.45	1.20	9.52	4.22	1.46	5.17	1.65	0.30
TCEP	ND	0.88	ND	0.99	ND	2.07	ND	0.70
TCIPP	7.46	50.74	10.41	17.94	1.63	22.40	6.01	1577.19
TPeP	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
TDCPP	1.79	3.50	ND	3.90	ND	4.56	ND	4.67
TBEP	ND	0.56	ND	ND	9.78	1.12	ND	ND
TPhP	2.49	1.16	ND	ND	ND	0.35	ND	ND
EDP	3.51	57.61	10.94	ND	0.86	ND	0.75	ND
TEHP	22.76	1.96	17.99	3.78	2.84	2.26	2.31	0.53
CDP	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
o-TCP	1.63	ND	3.69	ND	ND	0.45	ND	ND
m-TCP	2.40	0.59	2.35	0.60	0.60	0.58	0.59	0.59
p-TCP	1.65	0.42	1.64	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41
BPDP	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
TiPPP	1.09	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Σ17OPEs	48.2	118.6	56.6	31.8	17.6	39.4	11.7	1584.4

表 7 八月各採樣測站 OPEs 濃度

(ng/m³)

OPEs	TS0		TS1		TS2		TS3		TS4	
	顆粒相	溶解相	顆粒相	溶解相	顆粒相	溶解相	顆粒相	溶解相	顆粒相	溶解相
TEP	ND	ND	2.80	ND	2.19	ND	8.82	ND	2.90	ND
TPrP	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.58	ND	ND	ND
TBP	ND	0.52	0.98	0.62	2.63	0.86	2.98	0.63	1.49	ND
TCEP	2.31	1.50	1.65	1.34	1.89	1.40	1.53	1.49	2.54	1.42
TCIPP	1147.83	5.17	1211.45	1.71	49.78	0.87	3.22	0.86	56.09	0.95
TPeP	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
TDCPP	5.23	ND	1.45	ND	1.52	ND	ND	ND	1.21	ND
TBEP	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
TPhP	1.22	0.76	1.42	0.63	0.90	0.67	0.53	0.76	6.94	0.69
EDP	0.39	0.61	0.40	0.41	ND	0.44	ND	0.47	0.41	0.43
TEHP	ND	0.60	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
CDP	ND	1.01	ND	1.66	ND	1.17	ND	1.02	ND	ND
o-TCP	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
m-TCP	0.34	0.39	ND	0.35	0.34	0.35	ND	0.34	0.34	ND
p-TCP	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
BPDP	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
TiPPP	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Σ17OPEs	1160.4	12.8	1222.6	9.3	61.5	8.3	20.9	8.1	74.0	7.3

表 8 九月各採樣測站 OPEs 濃度

(ng/m³)

OPEs	TS0		TS1		TS2		TS3		TS4	
	顆粒相	溶解相	顆粒相	溶解相	顆粒相	溶解相	顆粒相	溶解相	顆粒相	溶解相
TEP	2.31	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	1.87	ND
TPrP	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
TBP	3.67	0.97	2.32	0.77	0.68	1.53	1.71	ND	ND	0.57
TCEP	2.91	1.40	2.32	1.40	2.27	1.50	2.05	1.45	1.75	1.34
TCIPP	1821.65	4.85	14.07	1.04	387.68	4.43	47.62	1.09	1519.29	6.81
TPeP	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
TDCPP	7.92	0.86	2.58	ND	1.20	0.86	1.62	ND	ND	3.55
TBEP	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
TPhP	1.40	0.72	0.97	0.79	0.66	0.70	0.63	0.75	1.58	0.98
EDP	0.39	0.50	ND	0.48	ND	0.52	ND	0.46	ND	0.53
TEHP	ND	ND	ND	0.52	ND	0.63	ND	ND	ND	0.47
CDP	ND	0.92	ND	1.13	ND	1.45	ND	0.95	ND	1.11
o-TCP	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
m-TCP	0.35	ND	0.34	0.35	0.34	0.35	0.35	0.34	0.35	0.35
p-TCP	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
BPDP	ND	ND	ND	0.56	ND	ND	ND	ND	ND	ND
TiPPP	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Σ17OPEs	1842.9	12.3	25.9	8.8	395.7	13.7	56.9	7.5	1528.6	17.3

表 9 十月各採樣測站 OPEs 濃度

(ng/m³)

OPEs	TS0		TS1		TS2		TS3		TS4	
	顆粒相	溶解相	顆粒相	溶解相	顆粒相	溶解相	顆粒相	溶解相	顆粒相	溶解相
TEP	7.65	ND	ND	ND	1.34	ND	ND	ND	ND	ND
TPrP	0.59	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
TBP	5.73	ND	1.17	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
TCEP	6.30	1.37	3.11	1.54	1.50	1.45	2.00	1.42	1.38	1.45
TCIPP	1625.11	7.71	24.05	13.26	15.03	9.11	113.23	9.20	7.03	5.72
TPeP	0.48	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
TDCPP	12.14	ND	3.76	1.02	1.88	ND	11.31	ND	2.87	ND
TBEP	ND	ND	ND	ND	0.80	ND	ND	ND	ND	ND
TPhP	5.68	0.77	1.13	0.88	0.59	0.72	7.00	0.66	1.16	0.66
EDP	0.41	0.41	0.41	0.57	0.39	0.47	0.40	0.46	ND	0.41
TEHP	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
CDP	0.99	1.07	ND	2.65	0.87	1.09	0.95	1.41	ND	1.13
o-TCP	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
m-TCP	0.34	0.34	0.34	0.42	0.34	0.37	0.35	0.37	0.37	0.34
p-TCP	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
BPDP	ND	ND	ND	0.59	ND	ND	ND	ND	ND	ND
TiPPP	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Σ17OPEs	1666.5	14.4	36.6	23.7	24.4	16.2	137.5	16.4	15.9	12.5

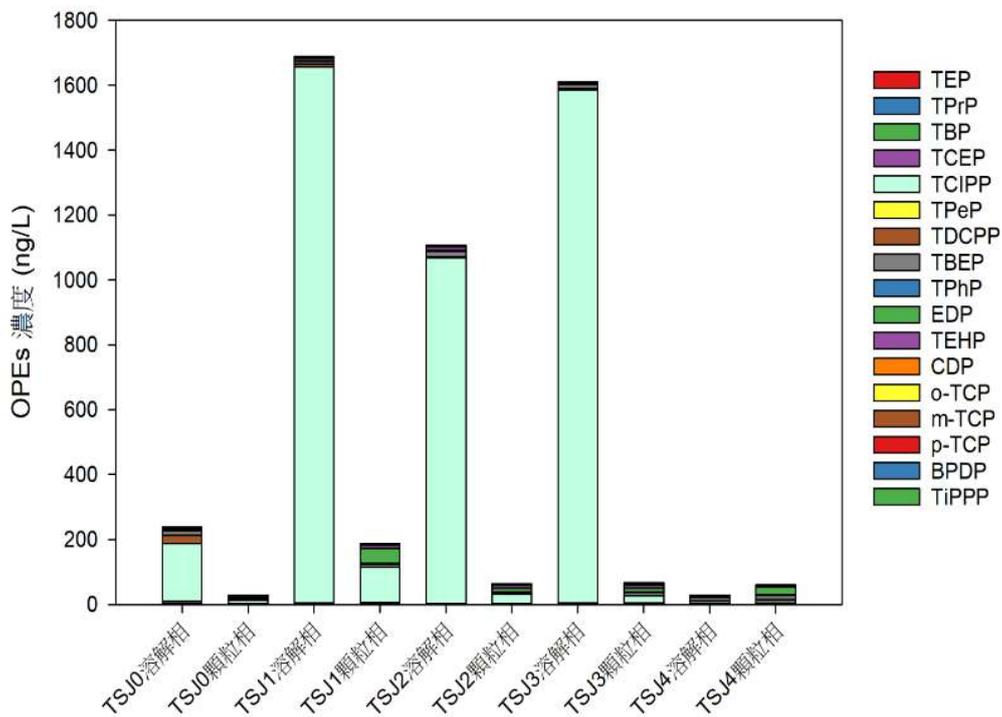


圖 12 四月各測站顆粒相與溶解相之 OPEs 濃度

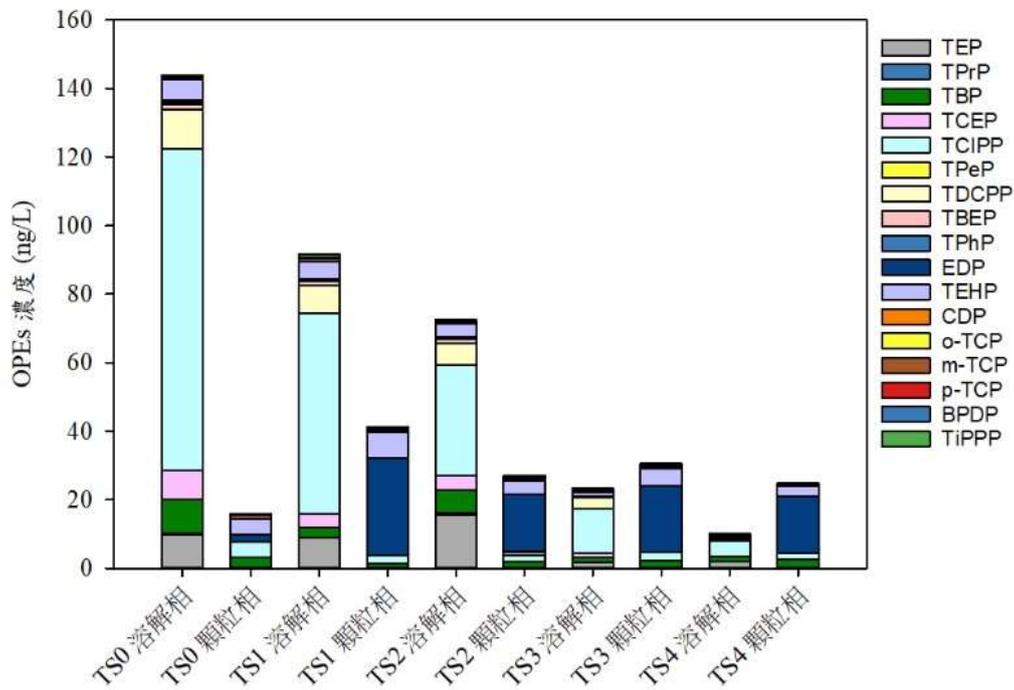


圖 13 五月各測站顆粒相與溶解相之 OPEs 濃度

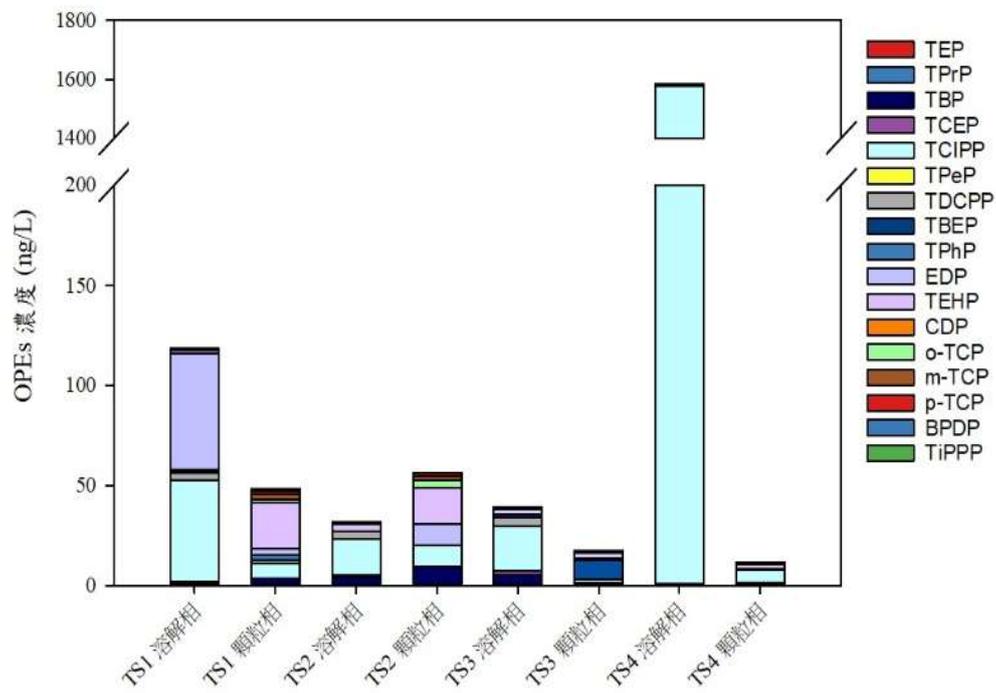


圖 14 七月各測站顆粒相與溶解相之 OPEs 濃度

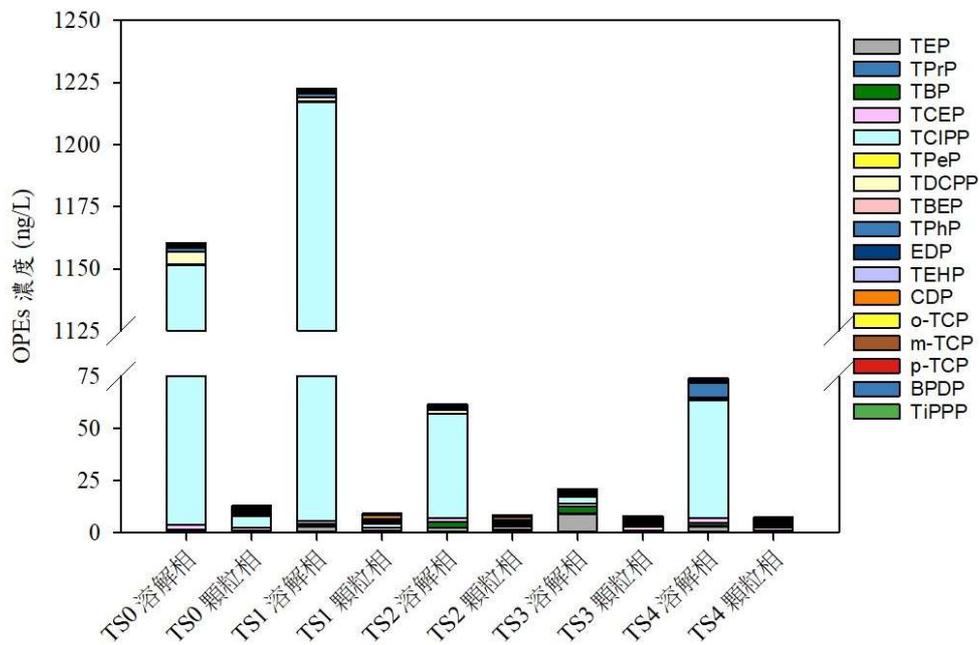


圖 15 八月各測站顆粒相與溶解相之 OPEs 濃度

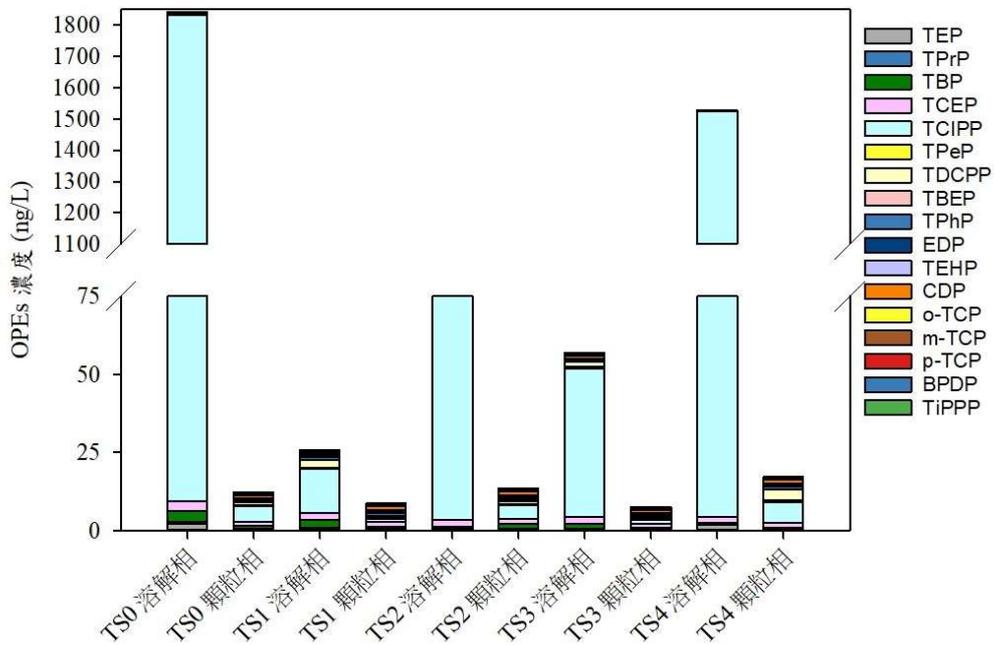


圖 16 九月各測站顆粒相與溶解相之 OPEs 濃度

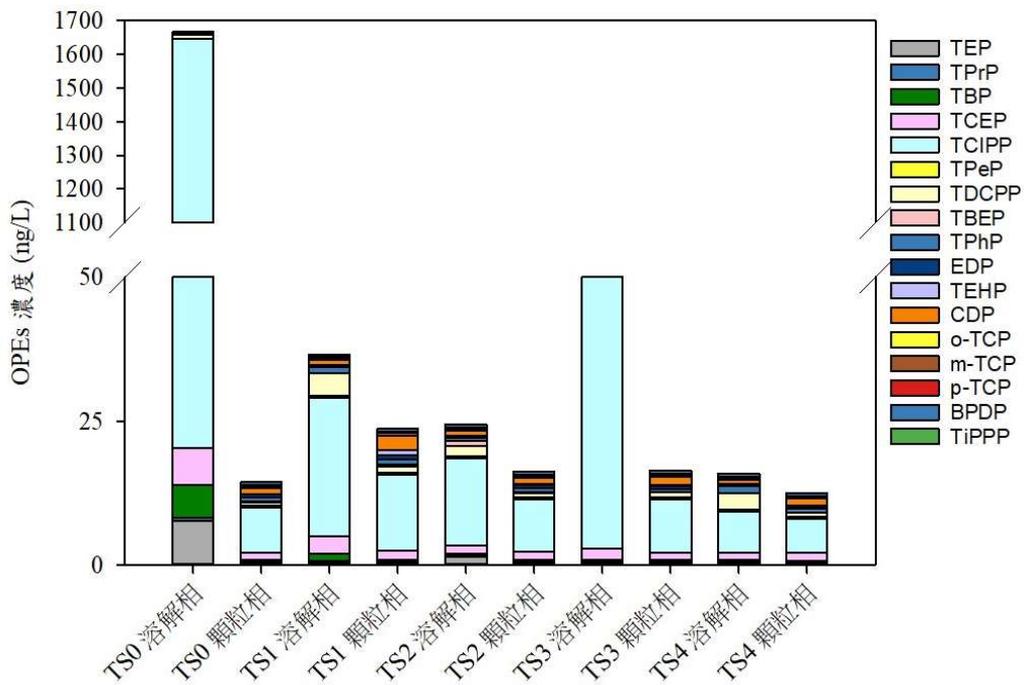


圖 17 十月各測站顆粒相與溶解相之 OPEs 濃度

4.1.2 OPEs 濃度組成

四、五、七、八、九月和十月各採樣點 OPEs 濃度組成結果如圖 18、19、20、21、22、23 所示。四月樣品中 OPEs 濃度組成中大部分以氯化 OPEs 佔比最高，不過在 TS0 溶解相、TS3 溶解相、TS4 顆粒相中反而是以烷基 OPEs 最多，芳基 OPEs 只有在 TS4 溶解相組成最多；五月樣品中 OPEs 濃度組成中一樣主要以氯化 OPEs 為主，而在 TS1 顆粒相、TS2 顆粒相、TS3 顆粒相、TS4 顆粒相中則是以芳基 OPEs 為主，只有在 TS0 顆粒相中烷基 OPEs 最多；七月樣品中 OPEs 濃度組成中還是以氯化 OPEs 佔比最多，而在 TS1 顆粒相、TS2 顆粒相、TS3 顆粒相中以烷基 OPEs 最多，而芳基 OPEs 只有在 TS1 溶解相最多；八、九、十月的樣品中 OPEs 濃度組成同樣是以氯化 OPEs 佔比最多，不過在八月的 TS3 顆粒相和溶解相中，則是以芳基跟烷基 OPEs 為主。可以看得出在各個月份中都是以氯化 OPEs 佔比最高這可能是因為氯化 OPEs 相比其他 OPEs 有更長的环境持久性且其來源也比另外兩個 OPEs 還多。

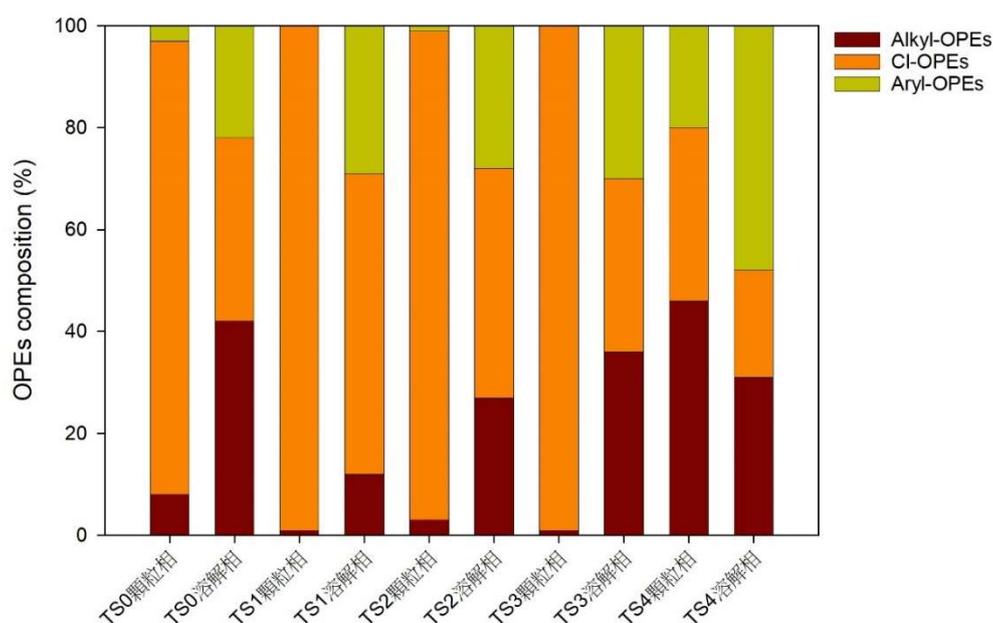


圖 18 四月 OPEs 組成

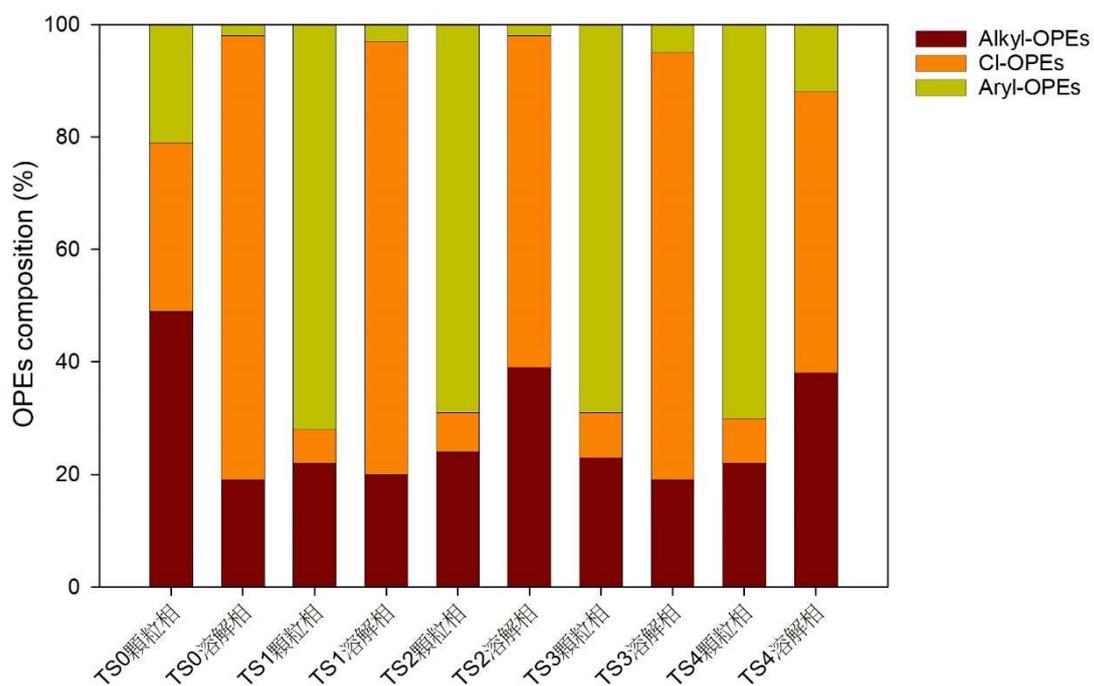


圖 19 五月 OPEs 組成

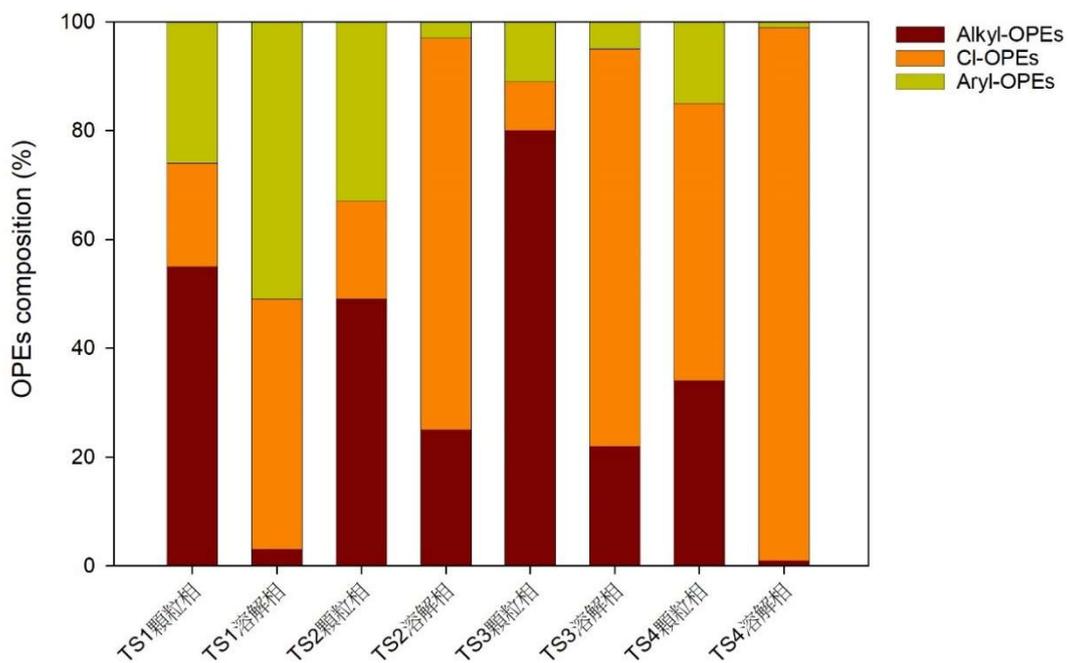


圖 20 七月 OPEs 組成

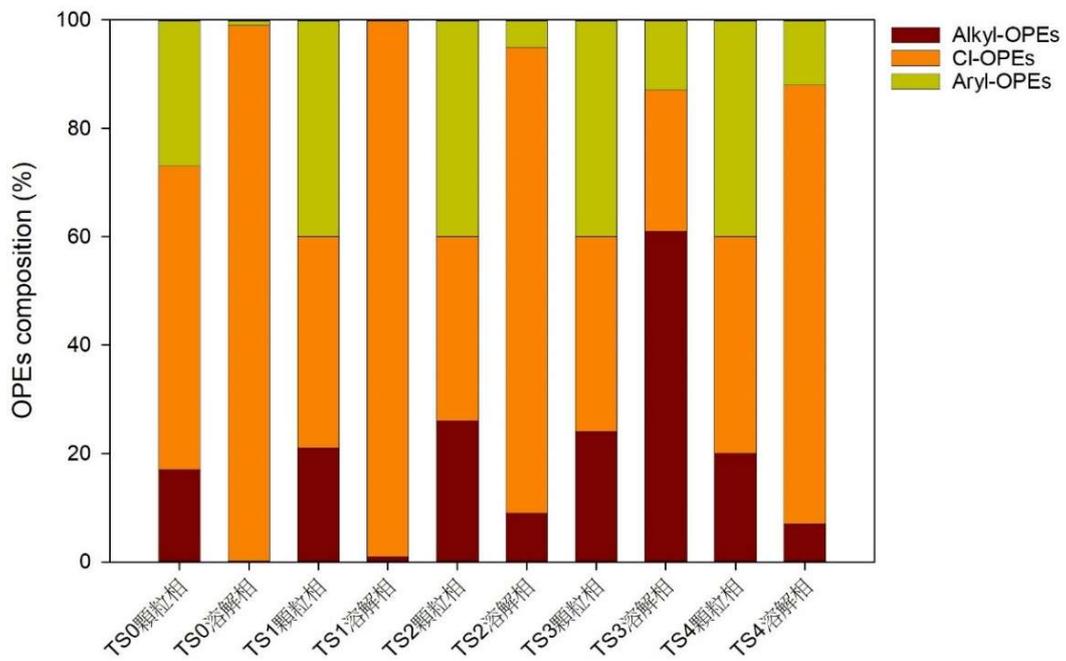


圖 21 八月 OPEs 組成

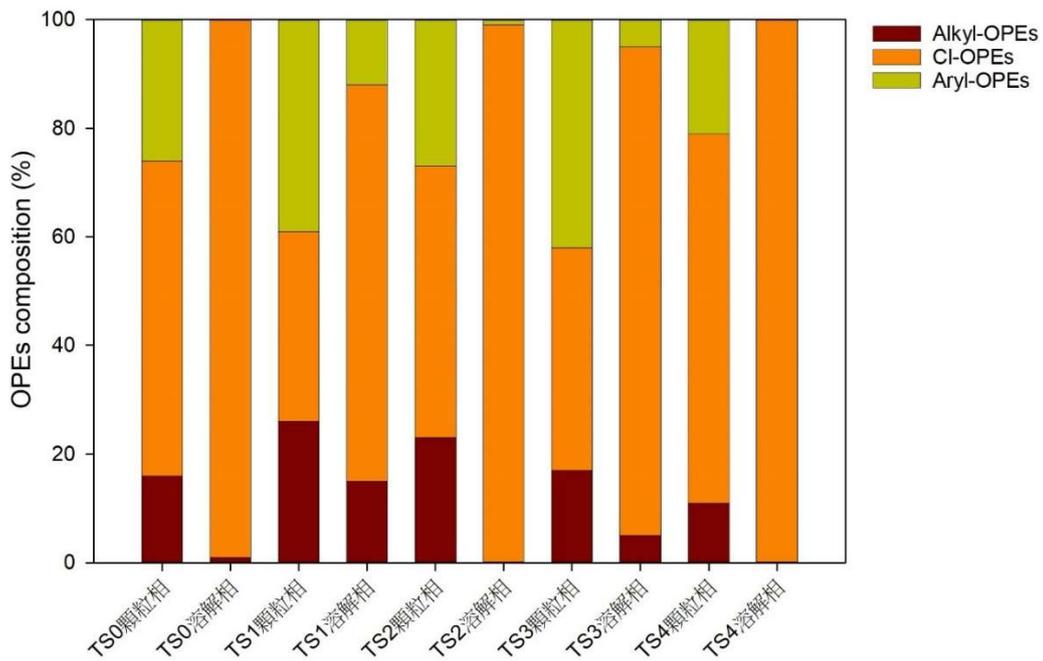


圖 22 九月 OPEs 組成

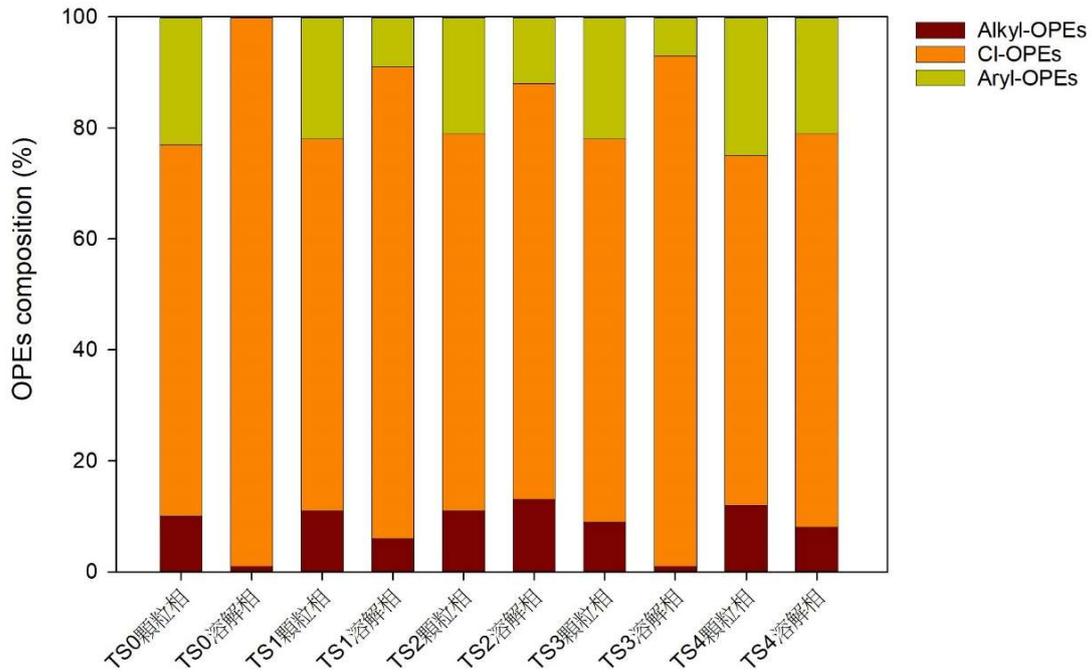


圖 23 十月 OPEs 組成

4.1.3 OPEs 與其他國家之比較

表 10 為本研究與其他國家地區 OPEs 之相較，從污染物來看可發現，TCIPP 是主要的污染物成分，這與研究中氯化 OPEs 較容易出現在樣品裡結果一致，但在其他國家的河川 OPEs 濃度研究中，中國南海及東海地區和五大湖的非氯化 OPEs 濃度反而相對較高，而歐美地區亦是以氯化 OPEs 為主，不過主要汙染來源還是依照當地產業為主要影響。

4.1.4 風險評估

根據計算結果中的 RQ，RQ 值排序如下：無顯著風險 ($RQ < 0.1$)、中等風險 ($0.1 < RQ < 1$) 和顯著風險 ($RQ > 1$)，在生物毒性方面根據表 11、12、13、14、15、16 中的四月、五月、七月、八月、九月和十月，以 TCEP、TDCPP、TPhP、TBEP、TBP、TEP、TCIPP 中各點位之計算後 RQ 值皆為無顯著風險($RQ < 0.1$)。

表 10 OPEs 與其他國家之比較

Regions	Site numbers	TCEP	TCIPP	TDCIPP	TEHP	TIBP	TNBP	TPHP	∑OPEs	Reference
中國北部灣/ 夏天	81	1.22-44.9	13.4-164	n.d.-6.65	n.d.-12.7	7.99-151	0.35-1033	0-26	34.2-1227	Li et al., 2019
中國北部灣/ 冬天	81	0.65-13.2	3.37-112	0.68-2.67	n.d.-1.53	0.48-58.2	n.d.-782	n.d.	20.6-840	Li et al., 2019
始華湖/韓國	43	3.26-5963	n.d.-5100	n.d.-325	n.d.-1.53	/	/	n.d.-96.2.	28.3-16000	Lee et al., 2018
亞馬遜河	16	1.6	74-1300	/	n.d.	<LOQ- 6.5	n.d.	<LOQ- 6.9	74.0-1341.1	Schmidt et al., 2019
五大湖/加拿 大和美國	12	0.72	5.87	1.99	/	/	1.13	0.49	44.6	Venier et al., 2014
舊金山灣區/ 美國	12	7.4-300	46-2900	14-450	<0.4-11	/	7.8-43	41-360	170-4100	Sutton et al., 2019
黃海、東海/ 中國海域	61	0.59-19.8	3.97-35.6	<MDL- 8.13	/	<MDL- 27.4	<MDL- 37.2	<MDL- 3.28	8.81-100	Zhong et al., 2020
羅納河/法國	22	n.d.-25.0	36.6-173.1	/	/	3.8-9.3	4.4-138.1	n.d.-1.4	84.8-264.6	Schmidt et al., 2020
太湖/ 中國	29	31.6-1870	/	/	<MDL- 0.249	6.51-72.5	3.61-334	<MDL- 79.5	166-15300	Wang et al., 2018
淡水河/台灣	15	1.74-8.93	43.09- 466.36	4.73-11.91	5.97-8.24	1.71-6.72	/	0.68-1.35	119.4-533.3	本研究

表 11 四月各採樣測站 7 種 OPEs 之風險商數(RQ)

化合物	物種	PNEC (ng L ⁻¹)	RQ				
			TS0	TS1	TS2	TS3	TS4
TCEP	藻類(柵狀藻) (Scenedesmus subspicatus)	51,000	0.0000318	0.0000682	0.0000269	0.0000502	0.0000202
	甲殼類(大型溞) (Daphnia magna)	333,000	0.0000049	0.0000105	0.0000041	0.0000077	0.0000031
	魚類(鯽魚) (Carassius auratus)	90,000	0.0000180	0.0000387	0.0000152	0.0000284	0.0000114
TDCPP	藻類(月牙藻) (Pseudokirchneriella subcapitata)	39,000	0.0006482	0.0006482	0.0000803	0.0001300	0.0000803
	甲殼類(大型溞) (Daphnia magna)	4,200	0.0060190	0.0060190	0.0007452	0.0012071	0.0007452
	魚類(鯽魚) (Carassius auratus)	5,100	0.0049569	0.0049569	0.0006137	0.0009941	0.0006137
TPhP	藻類(柵狀藻) (Scenedesmus subspicatus)	500	0.0039800	0.0095000	0.0039600	0.0055800	0.0040400
	甲殼類(大型溞) (Daphnia magna)	1,100	0.0018091	0.0043182	0.0018000	0.0025364	0.0018364
	魚類(鯽魚) (Carassius auratus)	700	0.0028429	0.0067857	0.0028286	0.0039857	0.0028857

化合物	物種	PNEC (ng L ⁻¹)	RQ				
			TS0	TS1	TS2	TS3	TS4
TBEP	甲殼類(大型溞) (<i>Daphnia magna</i>)	75,000	0.0002392	0.0002055	0.0003181	0.0003000	0.0003180
TBEP	魚類(胖頭鯉) (<i>Pimephales promelas</i>)	13,000	0.0013800	0.0011854	0.0018354	0.0017308	0.0018346
TBP	藻類(小球藻) (<i>Chlorella emersonii</i>)	10,000	0.0003350	0.0004840	0.0002460	0.0003150	0.0002160
	藻類(柵狀藻) (<i>Scenedesmus subspicatus</i>)	1,100	0.0030455	0.0044000	0.0022364	0.0028636	0.0019636
	甲殼類(豐年蝦) (<i>Artemia salina</i>)	54,600	0.0000614	0.0000886	0.0000451	0.0000577	0.0000396
	甲殼類(大型溞) (<i>Daphnia magna</i>)	2,100	0.0015952	0.0023048	0.0011714	0.0015000	0.0010286
	魚類(鯽魚) (<i>Carassius auratus</i>)	8,800	0.0003807	0.0005500	0.0002795	0.0003580	0.0002455
TEP	藻類(柵狀藻) (<i>Scenedesmus subspicatus</i>)	900,000	0.0000018	0.0000022	0.0000017	0.0000018	0.0000016
	甲殼類(大型溞) (<i>Daphnia magna</i>)	350,000	0.0000046	0.0000056	0.0000043	0.0000046	0.0000041
TCIPP	藻類(柵狀藻) (<i>Scenedesmus subspicatus</i>)	45,000	0.0041760	0.0391398	0.0242851	0.0356398	0.0003956

化合物	物種	PNEC (ng L ⁻¹)	RQ				
			TS0	TS1	TS2	TS3	TS4
	甲殼類(大型溞) (<i>Daphnia magna</i>)	91,000	0.0020651	0.0193548	0.0120091	0.0176241	0.0001956
	魚類(孔雀魚) (<i>Poecilia reticulata</i>)	30,000	0.0062640	0.0587097	0.0364277	0.0534597	0.0005933

表 12 五月各採樣測站 7 種 OPEs 之風險商數(RQ)

化合物	物種	PNEC (ng L ⁻¹)	RQ				
			TS0	TS1	TS2	TS3	TS4
TCEP	藻類(柵狀藻) (Scenedesmus subspicatus)	51,000	0.0001647	0.0000763	0.0000835	0.0000255	---
	甲殼類(大型溞) (Daphnia magna)	333,000	0.0000252	0.0000117	0.0000128	0.0000039	---
	魚類(鯽魚) (Carassius auratus)	90,000	0.0000933	0.0000432	0.0000473	0.0000144	---
TDCPP	藻類(月牙藻) (Pseudokirchneriella subcapitata)	39,000	0.0002936	0.0002067	0.0001605	0.0000897	0.0000131
	甲殼類(大型溞) (Daphnia magna)	4,200	0.0027262	0.0019190	0.0014905	0.0008333	0.0001214
	魚類(鯽魚) (Carassius auratus)	5,100	0.0022451	0.0015804	0.0012275	0.0006863	0.0001000
TPhP	藻類(柵狀藻) (Scenedesmus subspicatus)	500	0.0010800	0.0006200	0.0010400	---	---
	甲殼類(大型溞) (Daphnia magna)	1,100	0.0004909	0.0002818	0.0004727	---	---
	魚類(鯽魚) (Carassius auratus)	700	0.0007714	0.0004429	0.0007429	---	---
TBEP	甲殼類(大型溞) (Daphnia magna)	75,000	0.0000219	0.0000183	0.0000291	---	---
	魚類(胖頭鯉) (Pimephales promelas)	13,000	0.0001262	0.0001054	0.0001677	---	---
TBP	藻類(小球藻) (Chlorella emersonii)	10,000	0.0013090	0.0004460	0.0008480	0.0003710	0.0003840
	藻類(柵狀藻) (Scenedesmus subspicatus)	1,100	0.0119000	0.0040545	0.0077091	0.0033727	0.0034909

化合物	物種	PNEC (ng L ⁻¹)	RQ				
			TS0	TS1	TS2	TS3	TS4
	甲殼類(豐年蝦) (<i>Artemia salina</i>)	54,600	0.0002397	0.0000817	0.0001553	0.0000679	0.0000703
	甲殼類(大型溞) (<i>Daphnia magna</i>)	2,100	0.0062333	0.0021238	0.0040381	0.0017667	0.0018286
	魚類(鯽魚) (<i>Carassius auratus</i>)	8,800	0.0014875	0.0005068	0.0009636	0.0004216	0.0004364
TEP	藻類(柵狀藻) (<i>Scenedesmus subspicatus</i>)	900,000	0.0000107	0.0000098	0.0000173	0.0000018	0.0000022
	甲殼類(大型溞) (<i>Daphnia magna</i>)	350,000	0.0000275	0.0000251	0.0000446	0.0000045	0.0000057
TCIPP	藻類(柵狀藻) (<i>Scenedesmus subspicatus</i>)	45,000	0.0021920	0.0013547	0.0007611	0.0003364	0.0001431
	甲殼類(大型溞) (<i>Daphnia magna</i>)	91,000	0.0010840	0.0006699	0.0003764	0.0001664	0.0000708
	魚類(孔雀魚) (<i>Poecilia reticulata</i>)	30,000	0.0032880	0.0020320	0.0011417	0.0005047	0.0002147

表 13 七月各採樣測站 7 種 OPEs 之風險商數(RQ)

化合物	物種	PNEC (ng L ⁻¹)	RQ			
			TS1	TS2	TS3	TS4
TCEP	藻類(柵狀藻) (Scenedesmus subspicatus)	51,000	0.0000173	0.0000194	0.0004392	0.0000137
	甲殼類(大型溞) (Daphnia magna)	333,000	0.0000026	0.0000030	0.0000673	0.0000021
	魚類(鯽魚) (Carassius auratus)	90,000	0.0000098	0.0000110	0.0002489	0.0000078
TDCPP	藻類(月牙藻) (Pseudokirchneriella subcapitata)	39,000	0.0001356	0.0001000	0.0000287	0.0001197
	甲殼類(大型溞) (Daphnia magna)	4,200	0.0012595	0.0009286	0.0002667	0.0011119
	魚類(鯽魚) (Carassius auratus)	5,100	0.0010373	0.0007647	0.0002196	0.0009157
TPhP	藻類(柵狀藻) (Scenedesmus subspicatus)	500	0.0073000	---	---	---
	甲殼類(大型溞) (Daphnia magna)	1,100	0.0033182	---	---	---
	魚類(鯽魚) (Carassius auratus)	700	0.0052143	---	---	---
TBEP	甲殼類(大型溞) (Daphnia magna)	75,000	0.0000075	---	0.0001351	---
	魚類(胖頭鯉) (Pimephales promelas)	13,000	0.0000431	---	0.0007792	---
TBP	藻類(小球藻) (Chlorella emersonii)	10,000	0.0004650	0.0013740	0.0003530	0.0001950
	藻類(柵狀藻) (Scenedesmus subspicatus)	1,100	0.0042273	0.0124909	0.0032091	0.0017727

化合物	物種	PNEC (ng L ⁻¹)	RQ			
			TS1	TS2	TS3	TS4
	甲殼類(豐年蝦) (<i>Artemia salina</i>)	54,600	0.0000852	0.0002516	0.0000647	0.0000357
	甲殼類(大型溞) (<i>Daphnia magna</i>)	2,100	0.0022143	0.0065429	0.0016810	0.0009286
	魚類(鯽魚) (<i>Carassius auratus</i>)	8,800	0.0005284	0.0015614	0.0004011	0.0002216
TEP	藻類(柵狀藻) (<i>Scenedesmus subspicatus</i>)	900,000	---	---	0.0000057	---
	甲殼類(大型溞) (<i>Daphnia magna</i>)	350,000	---	---	0.0000148	---
TCIPP	藻類(柵狀藻) (<i>Scenedesmus subspicatus</i>)	45,000	0.0012933	0.0006300	0.0001376	0.0351822
	甲殼類(大型溞) (<i>Daphnia magna</i>)	91,000	0.0006396	0.0003115	0.0000680	0.0173978
	魚類(孔雀魚) (<i>Poecilia reticulata</i>)	30,000	0.0019400	0.0009450	0.0002063	0.0527733

表 14 八月各採樣測站 7 種 OPEs 之風險商數(RQ)

化合物	物種	PNEC (ng L ⁻¹)	RQ				
			TS0	TS1	TS2	TS3	TS4
TCEP	藻類(柵狀藻) (Scenedesmus subspicatus)	51,000	0.0000745	0.0000588	0.0000643	0.0000592	0.0000776
	甲殼類(大型溞) (Daphnia magna)	333,000	0.0000114	0.0000090	0.0000098	0.0000091	0.0000119
	魚類(鯽魚) (Carassius auratus)	90,000	0.0000422	0.0000333	0.0000364	0.0000336	0.0000440
TDCPP	藻類(月牙藻) (Pseudokirchneriella subcapitata)	39,000	0.0001341	0.0000372	0.0000390	---	0.0000310
	甲殼類(大型溞) (Daphnia magna)	4,200	0.0012452	0.0003452	0.0003619	---	0.0002881
	魚類(鯽魚) (Carassius auratus)	5,100	0.0010255	0.0002843	0.0002980	---	0.0002373
TPhP	藻類(柵狀藻) (Scenedesmus subspicatus)	500	0.0039600	0.0041000	0.0031200	0.0025800	0.0152600
	甲殼類(大型溞) (Daphnia magna)	1,100	0.0018000	0.0018636	0.0014182	0.0011727	0.0069364
	魚類(鯽魚) (Carassius auratus)	700	0.0028286	0.0029286	0.0022286	0.0018429	0.0109000
TBEP	甲殼類(大型溞) (Daphnia magna)	75,000	---	---	---	---	---
	魚類(胖頭鯉) (Pimephales promelas)	13,000	---	---	---	---	---
TBP	藻類(小球藻) (Chlorella emersonii)	10,000	0.0000520	0.0001600	0.0003490	0.0003690	0.0001490
	藻類(柵狀藻) (Scenedesmus subspicatus)	1,100	0.0004727	0.0014545	0.0031727	0.0033545	0.0013545

化合物	物種	PNEC (ng L ⁻¹)	RQ				
			TS0	TS1	TS2	TS3	TS4
	甲殼類(豐年蝦) (<i>Artemia salina</i>)	54,600	0.0000095	0.0000293	0.0000639	0.0000676	0.0000273
	甲殼類(大型溞) (<i>Daphnia magna</i>)	2,100	0.0002476	0.0007619	0.0016619	0.0017571	0.0007095
	魚類(鯽魚) (<i>Carassius auratus</i>)	8,800	0.0000591	0.0001818	0.0003966	0.0004193	0.0001693
TEP	藻類(柵狀藻) (<i>Scenedesmus subspicatus</i>)	900,000	0.000011	0.00001	0.0000173	0.0000018	0.000002
	甲殼類(大型溞) (<i>Daphnia magna</i>)	350,000	0.000028	0.000025	0.0000446	0.0000045	0.000006
TCIPP	藻類(柵狀藻) (<i>Scenedesmus subspicatus</i>)	45,000	0.002192	0.0013547	0.0007611	0.0003364	0.000143
	甲殼類(大型溞) (<i>Daphnia magna</i>)	91,000	0.001084	0.00067	0.0003764	0.0001664	0.000071
	魚類(孔雀魚) (<i>Poecilia reticulata</i>)	30,000	0.003288	0.002032	0.0011417	0.0005047	0.000215

表 15 九月各採樣測站 7 種 OPEs 之風險商數(RQ)

化合物	物種	PNEC (ng L ⁻¹)	RQ				
			TS0	TS1	TS2	TS3	TS4
TCEP	藻類(柵狀藻) (Scenedesmus subspicatus)	51,000	0.0000845	0.0000729	0.0000739	0.0000688	0.0000606
	甲殼類(大型溞) (Daphnia magna)	333,000	0.0000129	0.0000112	0.0000113	0.0000105	0.0000093
	魚類(鯽魚) (Carassius auratus)	90,000	0.0000479	0.0000413	0.0000419	0.0000390	0.0000343
TDCPP	藻類(月牙藻) (Pseudokirchneriella subcapitata)	39,000	0.0002251	0.0000662	0.0000528	0.0000415	0.0000910
	甲殼類(大型溞) (Daphnia magna)	4,200	0.0020905	0.0006143	0.0004905	0.0003857	0.0008452
	魚類(鯽魚) (Carassius auratus)	5,100	0.0017216	0.0005059	0.0004039	0.0003176	0.0006961
TPhP	藻類(柵狀藻) (Scenedesmus subspicatus)	500	0.0042400	0.0035200	0.0027200	0.0027600	0.0051400
	甲殼類(大型溞) (Daphnia magna)	1,100	0.0019273	0.0016000	0.0012364	0.0012545	0.0023364
	魚類(鯽魚) (Carassius auratus)	700	0.0030286	0.0025143	0.0019429	0.0019714	0.0036714
TBEP	甲殼類(大型溞) (Daphnia magna)	75,000	---	---	---	---	---
	魚類(胖頭鯉) (Pimephales promelas)	13,000	---	---	---	---	---
TBP	藻類(小球藻) (Chlorella emersonii)	10,000	0.0004640	0.0003080	0.0002220	0.0001710	0.0000570
	藻類(柵狀藻) (Scenedesmus subspicatus)	1,100	0.0042182	0.0028000	0.0020182	0.0015545	0.0005182

化合物	物種	PNEC (ng L ⁻¹)	RQ				
			TS0	TS1	TS2	TS3	TS4
	甲殼類(豐年蝦) (<i>Artemia salina</i>)	54,600	0.0000850	0.0000564	0.0000407	0.0000313	0.0000104
	甲殼類(大型溞) (<i>Daphnia magna</i>)	2,100	0.0022095	0.0014667	0.0010571	0.0008143	0.0002714
	魚類(鯽魚) (<i>Carassius auratus</i>)	8,800	0.0005273	0.0003500	0.0002523	0.0001943	0.0000648
TEP	藻類(柵狀藻) (<i>Scenedesmus subspicatus</i>)	900,000	0.0000026	---	---	---	0.0000021
	甲殼類(大型溞) (<i>Daphnia magna</i>)	350,000	0.0000066	---	---	---	0.0000053
TCIPP	藻類(柵狀藻) (<i>Scenedesmus subspicatus</i>)	45,000	0.0405891	0.0003358	0.0087136	0.0010824	0.0339133
	甲殼類(大型溞) (<i>Daphnia magna</i>)	91,000	0.0200715	0.0001660	0.0043089	0.0005353	0.0167703
	魚類(孔雀魚) (<i>Poecilia reticulata</i>)	30,000	0.0608837	0.0005037	0.0130703	0.0016237	0.0508700

表 16 十月各採樣測站 7 種 OPEs 之風險商數(RQ)

化合物	物種	PNEC (ng L ⁻¹)	RQ				
			TS0	TS1	TS2	TS3	TS4
TCEP	藻類(柵狀藻) (Scenedesmus subspicatus)	51,000	0.0001506	0.0000912	0.0000578	0.0000671	0.0000553
	甲殼類(大型溞) (Daphnia magna)	333,000	0.0000231	0.0000140	0.0000089	0.0000103	0.0000085
	魚類(鯽魚) (Carassius auratus)	90,000	0.0000853	0.0000517	0.0000328	0.0000380	0.0000313
TDCPP	藻類(月牙藻) (Pseudokirchneriella subcapitata)	39,000	0.0003113	0.0001226	0.0000482	0.0002900	0.0000736
	甲殼類(大型溞) (Daphnia magna)	4,200	0.0028905	0.0011381	0.0004476	0.0026929	0.000683
	魚類(鯽魚) (Carassius auratus)	5,100	0.0023804	0.0009373	0.0003686	0.0022176	0.0005627
TPhP	藻類(柵狀藻) (Scenedesmus subspicatus)	500	0.0129000	0.0040200	0.0026200	0.0153200	0.0036400
	甲殼類(大型溞) (Daphnia magna)	1,100	0.0058636	0.0018273	0.0011909	0.0069636	0.0016545
	魚類(鯽魚) (Carassius auratus)	700	0.0092143	0.0028714	0.0018714	0.0109429	0.0026000
TBEP	甲殼類(大型溞) (Daphnia magna)	75,000	---	---	0.0000107	---	---
	魚類(胖頭鯉) (Pimephales promelas)	13,000	---	0.0000615	---	---	---
TBP	藻類(小球藻) (Chlorella emersonii)	10,000	0.0005730	0.0001170	---	---	---
	藻類(柵狀藻) (Scenedesmus subspicatus)	1,100	0.0052091	0.0010636	---	---	---

化合物	物種	PNEC (ng L ⁻¹)	RQ				
			TS0	TS1	TS2	TS3	TS4
	甲殼類(豐年蝦) (<i>Artemia salina</i>)	54,600	0.0001049	0.0000214	---	---	---
	甲殼類(大型溞) (<i>Daphnia magna</i>)	2,100	0.0027286	0.0005571	---	---	---
	魚類(鯽魚) (<i>Carassius auratus</i>)	8,800	0.0006511	0.0001330	---	---	---
TEP	藻類(柵狀藻) (<i>Scenedesmus subspicatus</i>)	900,000	0.0000085	---	0.0000015	---	0.0000021
	甲殼類(大型溞) (<i>Daphnia magna</i>)	350,000	0.0000219	---	0.0000038	---	0.0000053
TCIPP	藻類(柵狀藻) (<i>Scenedesmus subspicatus</i>)	45,000	0.0362851	0.0008291	0.0005367	0.0027207	0.0002833
	甲殼類(大型溞) (<i>Daphnia magna</i>)	91,000	0.0179432	0.0004100	0.0002654	0.0013454	0.0001401
	魚類(孔雀魚) (<i>Poecilia reticulata</i>)	30,000	0.0544277	0.0012437	0.0008050	0.0040810	0.0004250

4.2 微塑膠

4.2.1 微塑膠濃度分布

每月份各採樣點數據結果如表 17 所示。樣品中微塑膠總濃度範圍為 22~46 items/L 之間不等。於五月的數據中，微塑膠濃度與其他月份相比較低，其原因可能為受梅雨季之影響，導致微塑膠濃度減少，但照理來說，在乾季觀察到的微塑膠濃度最低，而在雨季能檢測到更高的濃度，呈現與雨量成正比的情況，其他影響濃度的原因或許與人口密度和土地使用有更高的相關。多數月份的 TS4 所測到的濃度較少，其原因可能是河口地區有較明顯的海水稀釋效應所導致。在七、八月中的微塑膠濃度高出其他月份許多，可能原因有因台灣在夏季常有颱風影響，下雨導致污染物沖刷到了下游，也或許為這兩個月份較其他月份的人類活動較多，而產生更多污染物。

表 17 各採樣測站微塑膠濃度

	(items/L)				
MPs	TS0	TS1	TS2	TS3	TS4
四月	38	35	35	30	25
五月	33	25	27	32	28
七月	-	39	46	38	27
八月	32	34	38	39	31
九月	27	22	25	28	29
十月	23	28	31	29	31

4.2.2 微塑膠特徵組成

一. 形狀

根據所有採集到的微塑膠之形狀，將淡水流域和海口之水中之微

塑膠分為碎片、薄膜、纖維、柔珠和發泡塑膠等 5 種類型。不同月份各採樣點微塑膠形狀特徵組成結果如圖 24-30 所示，據本研究採集之微塑膠類型，各月份樣品多為碎片類型，另柔珠及發泡塑膠於部分採樣點未發現。本研究不同月份(四、五、七、八、九、十)之各採集點採集之樣本，發現碎片為各採樣點之微塑膠數量最多類型，其餘數量比例排序分別為薄膜、纖維和柔珠，部分採樣點未發現有柔珠類型之微塑膠，另發泡塑膠類型於各採樣點皆未發現。

碎片之形成多以暴露於紫外線照射下產生光分解作用 (photodissociation) 和風化破碎作用 (detrition) 分解塑膠容器所得到之結果，可能為碎片數量較多之原因；出現柔珠類型之可能原因為周遭有工業清潔用品或個人護理清潔產品使用；發泡塑膠(保麗龍)之特性為可對抗衝擊，並常使用在船舶和遊艇之側邊，且經由海水拍打或雨水衝擊，有較大機率發泡塑膠會分解及剝落於海面上。

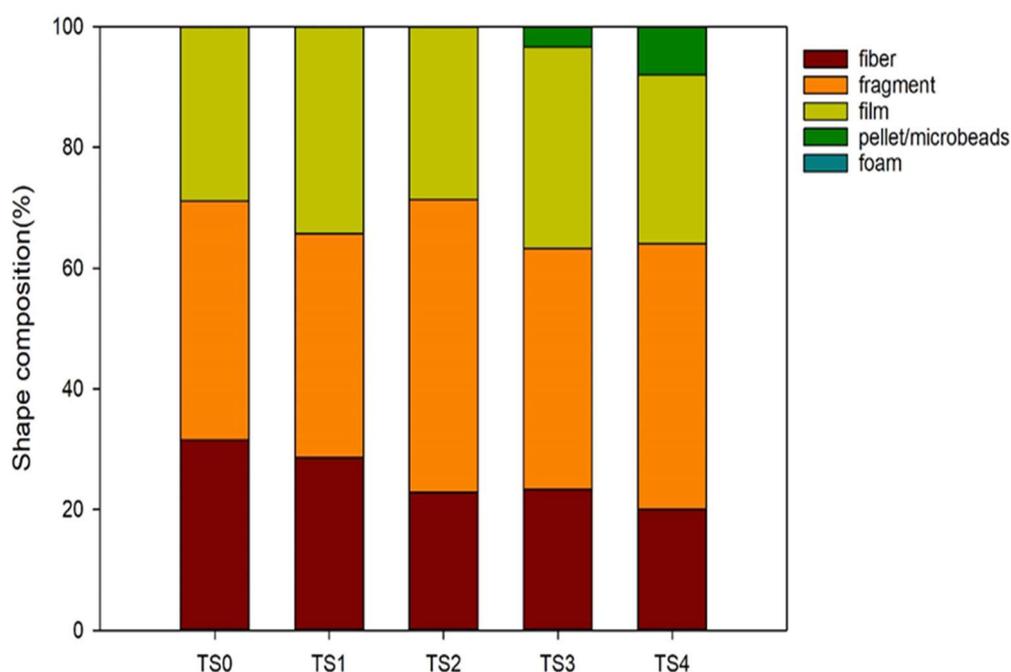


圖 24 四月微塑膠形狀比例圖

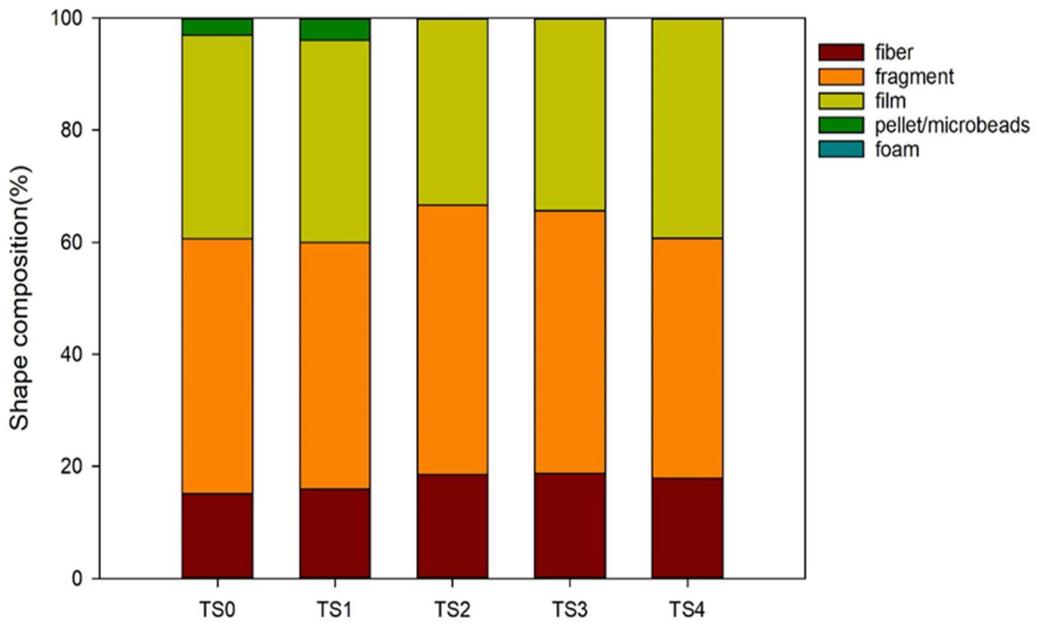


圖 25 五月微塑膠形狀比例

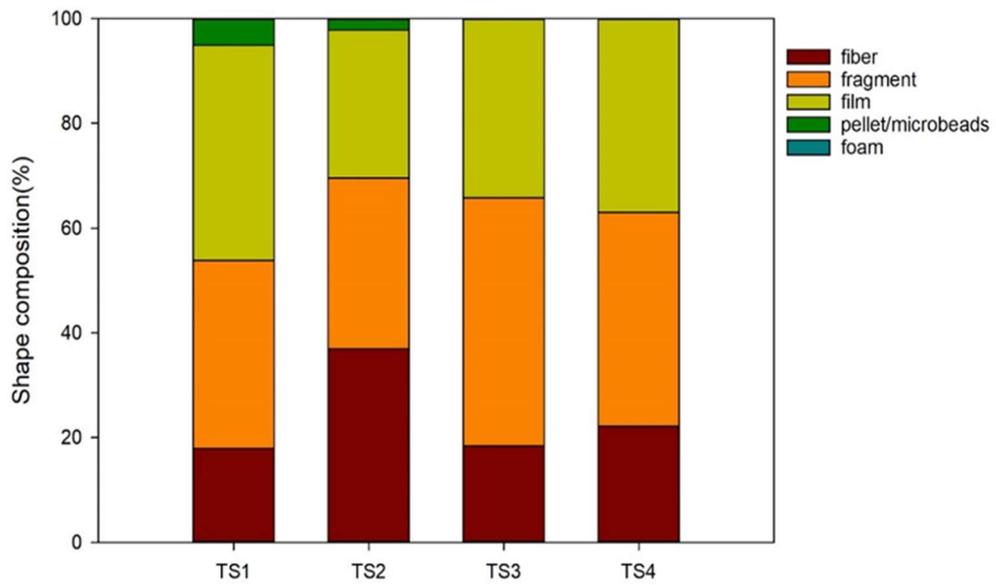


圖 26 七月微塑膠形狀比例

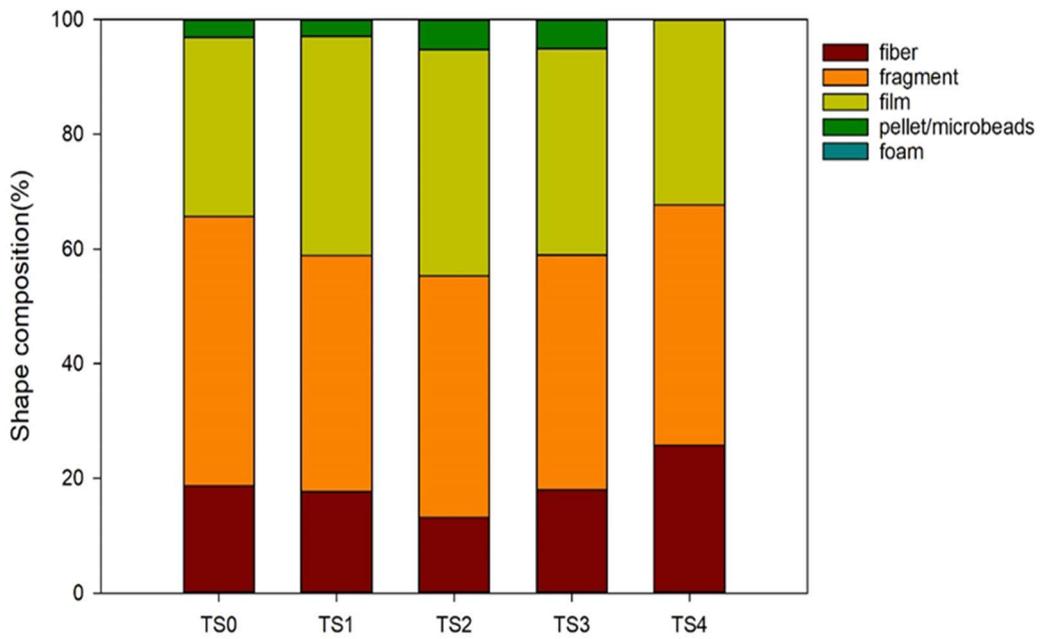


圖 27 八月微塑膠形狀比例

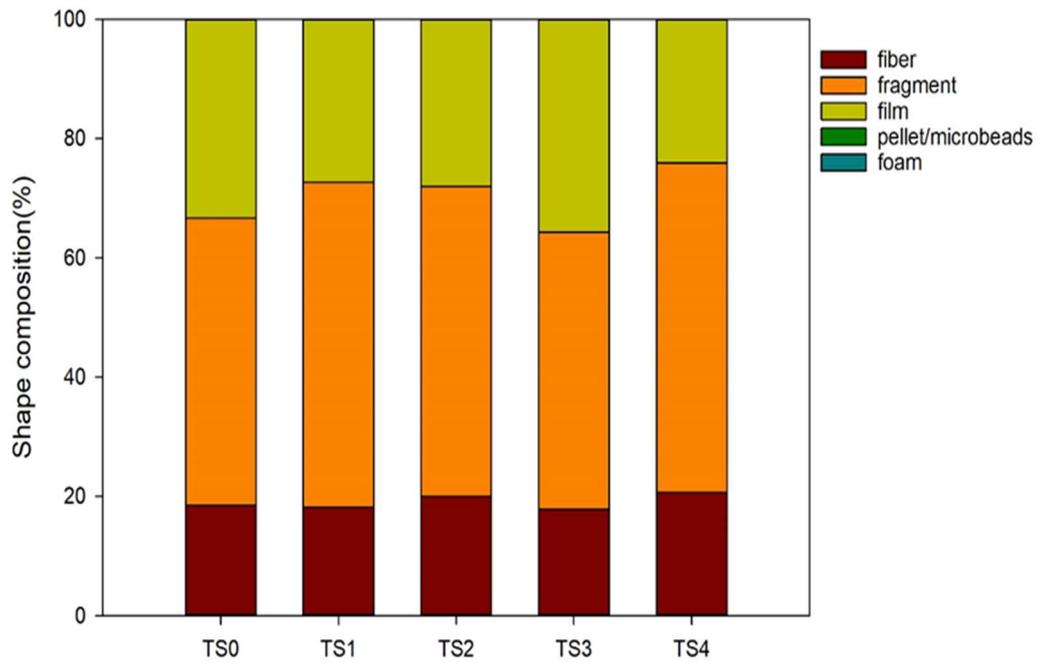


圖 28 九月微塑膠形狀比例

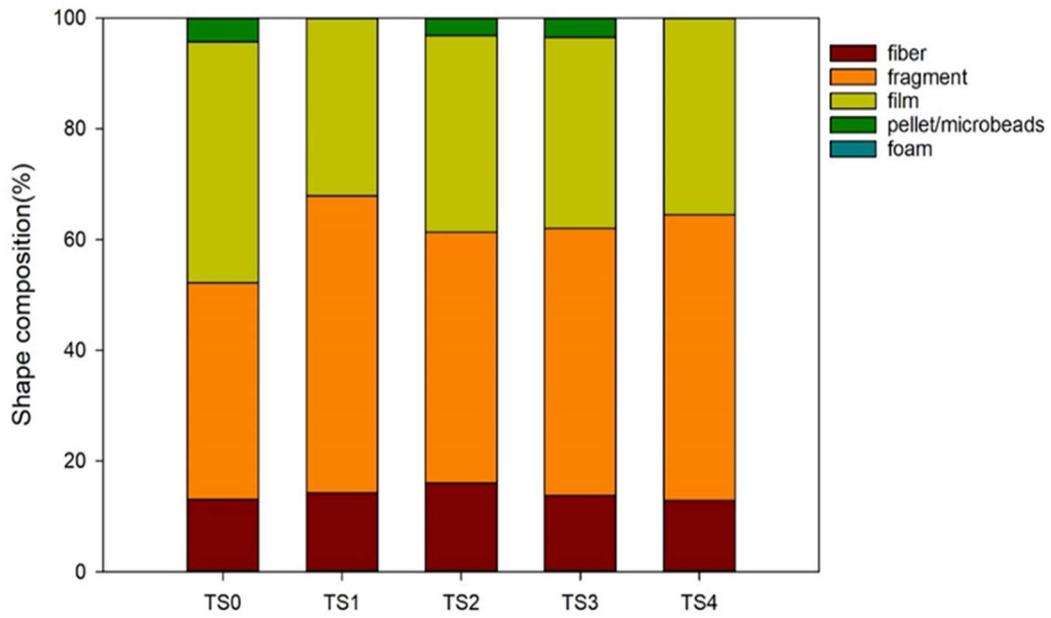


圖 29 十月微塑膠形狀比例

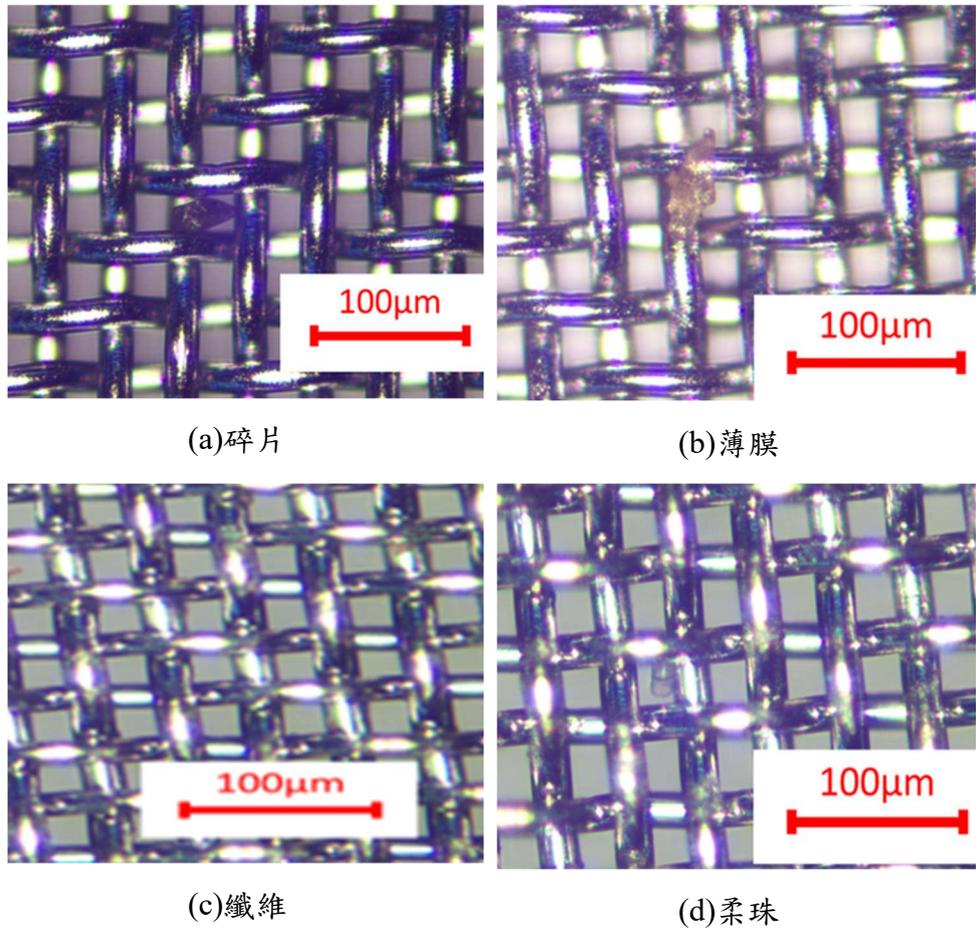


圖 30 生物顯微鏡下典型形狀特徵

尺寸

本研究將淡水流域及其河海口採集之水中微塑膠尺寸分成以下範圍： $>25\ \mu\text{m}$ 、 $25\sim 50\ \mu\text{m}$ 、 $51\sim 100\ \mu\text{m}$ 、 $101\sim 300\ \mu\text{m}$ 、 $301\sim 1000\ \mu\text{m}$ 和 $1001\sim 5000\ \mu\text{m}$ ，共六種微塑膠尺寸樣式，各月份採集微塑膠尺寸分布如圖 4-20~25。四月份各採樣點收集之微塑膠尺寸，以介於 $51\sim 100\ \mu\text{m}$ 間之數量最多，占採集之微塑膠 34.29~50%。另分析數量比例，分別為 $25\sim 0\ \mu\text{m}$ (10~34.29%)、 $101\sim 300\ \mu\text{m}$ (10.53~23.33%)、 $301\sim 1000\ \mu\text{m}$ (7.89~13.33%)、 $1001\sim 5000\ \mu\text{m}$ (3.33~14.29%) 和 $> 25\ \mu\text{m}$ (0.1~5.71%)。尺寸範圍為 $>25\ \mu\text{m}$ 及 $1000\sim 5000\ \mu\text{m}$ 之間皆有幾個採樣點未出現，於大部分月份採集點中之尺寸範圍主要以 $51\sim 100\ \mu\text{m}$ 為主。本研究以不銹鋼瓶採取表層河水，尺寸較小之微塑膠多輕易漂浮於水表層，因此其數量相對較多。尺寸較小之微塑膠易為水中生物或有機污染物之載體，並傷害環境、人類和生物；尺寸較大之微塑膠，亦能漂浮於表水層，倘有污染物或其他物質吸附於微塑膠表面，則可能會影響其重量或密度變重，進而沉入水底層變為沉積物，前述推測可能與尺寸較大之微塑膠數量較少相關。

二. 顏色

根據採集淡水流域和河海口之微塑膠顏色分為透明或白色、黑色和其他等三種顏色，各月份各採樣點採集之微塑膠，顏色多為透明或白色，黑色和其他顏色則占比較少，各月份採集微塑膠尺寸分布如圖 31~43。推測微塑膠顏色以透明或白色較多之可能原因，一為微塑膠平均約八成為碎片，而碎片主要來源可能為透明塑膠容器；另原帶有顏色之塑膠製品暴露於陽光紫外線照射下，產生反應使其風化或粹化導致退色而形成白色塑膠。黑色或其他顏色之微塑膠來源，可能多為食品外層包裝或塑膠外殼。

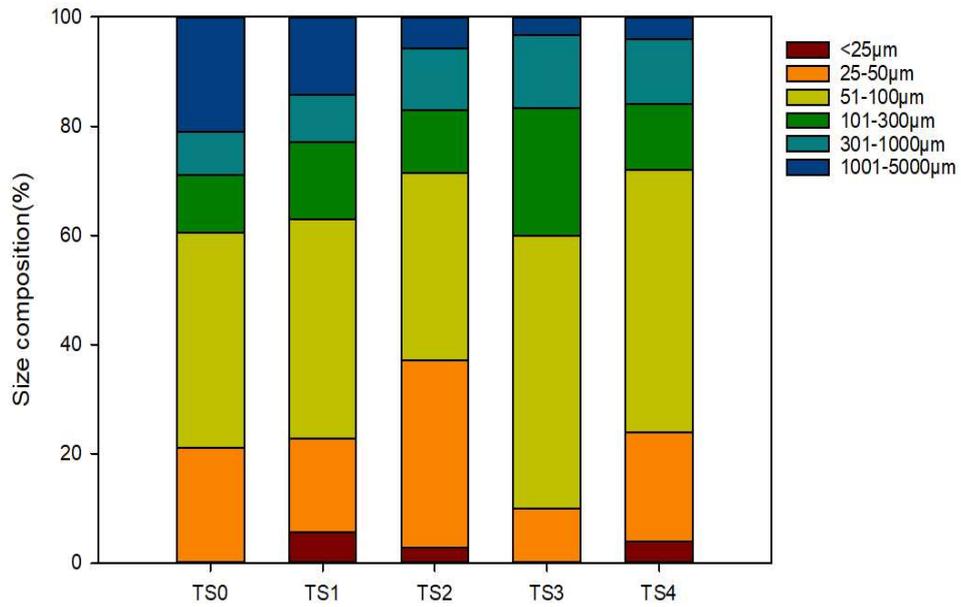


圖 31 四月微塑膠尺寸比例

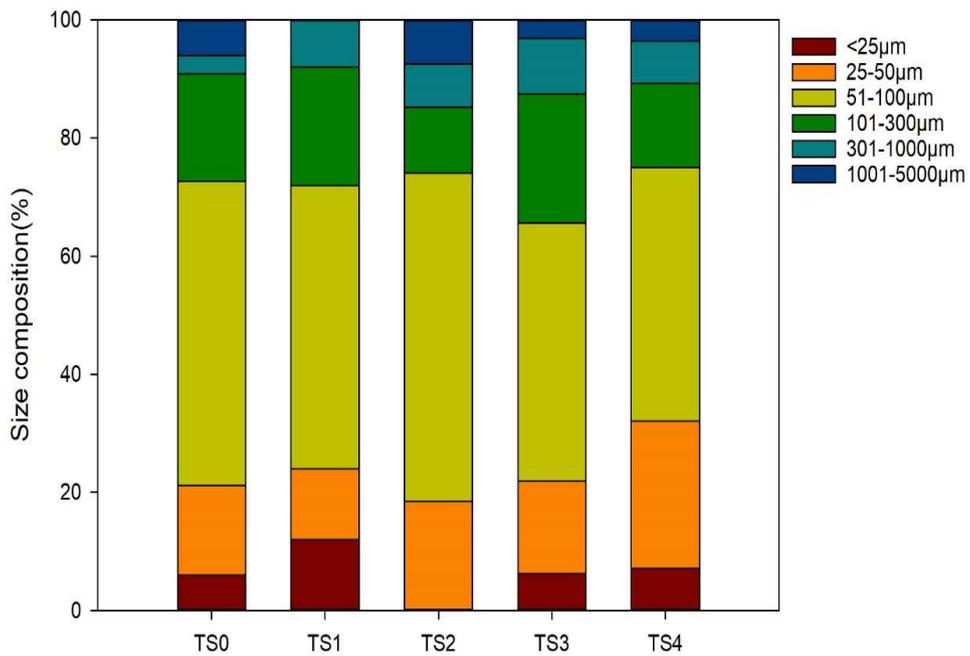


圖 32 五月微塑膠尺寸比例

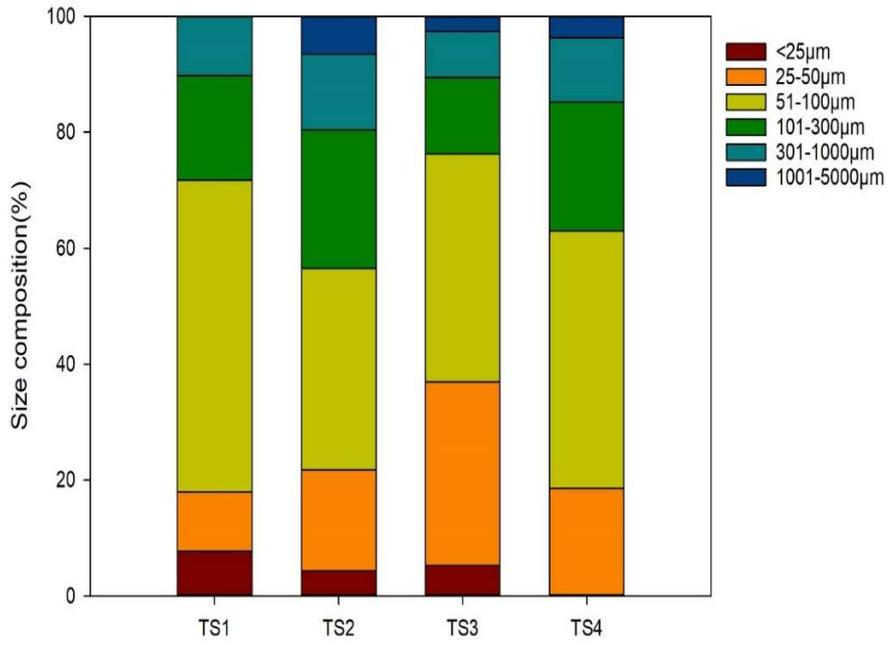


圖 33 七月微塑膠尺寸比例

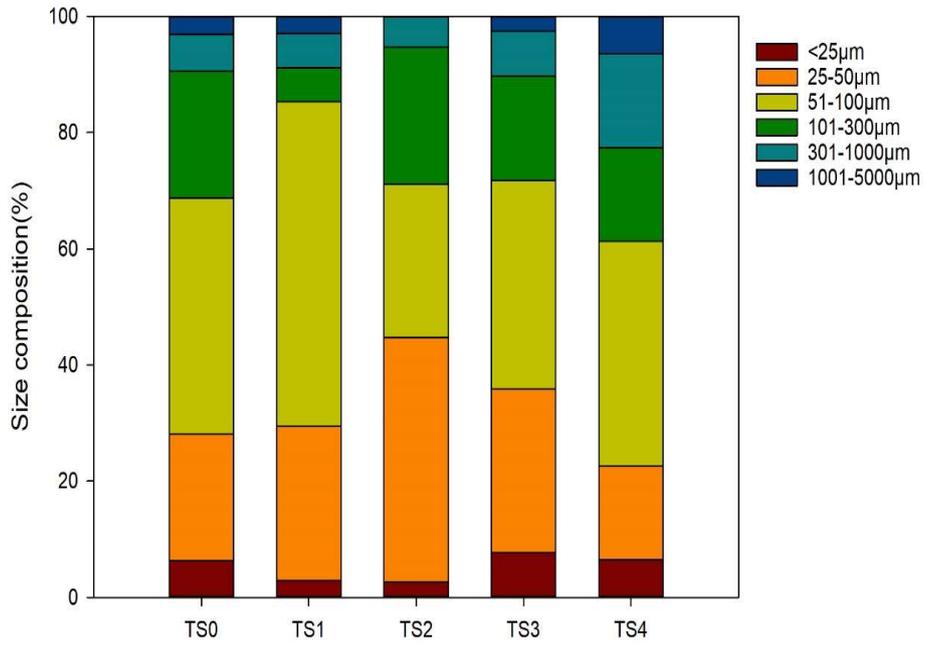


圖 34 八月微塑膠尺寸比例

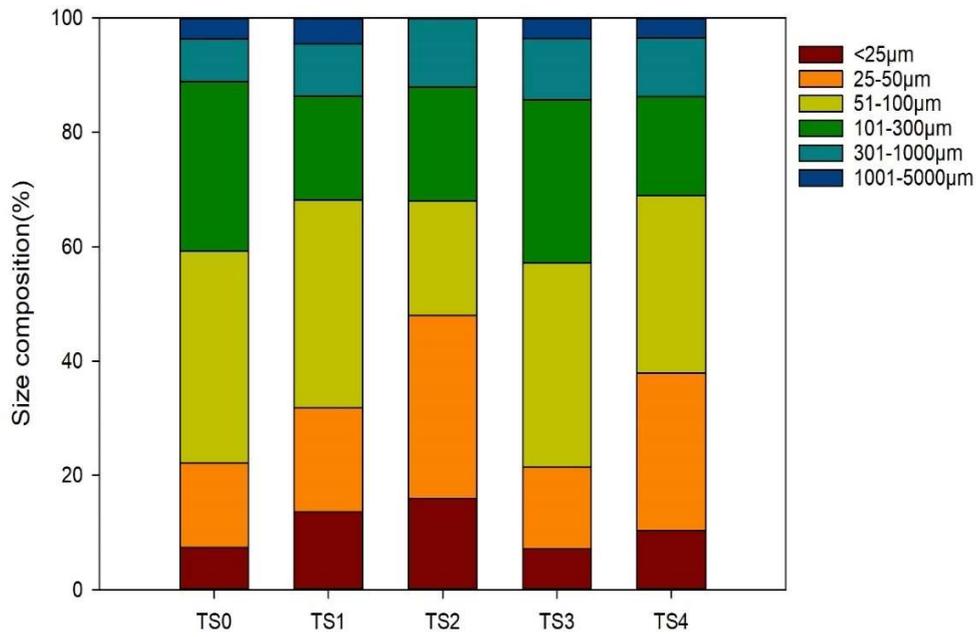


圖 35 九月微塑膠尺寸比例

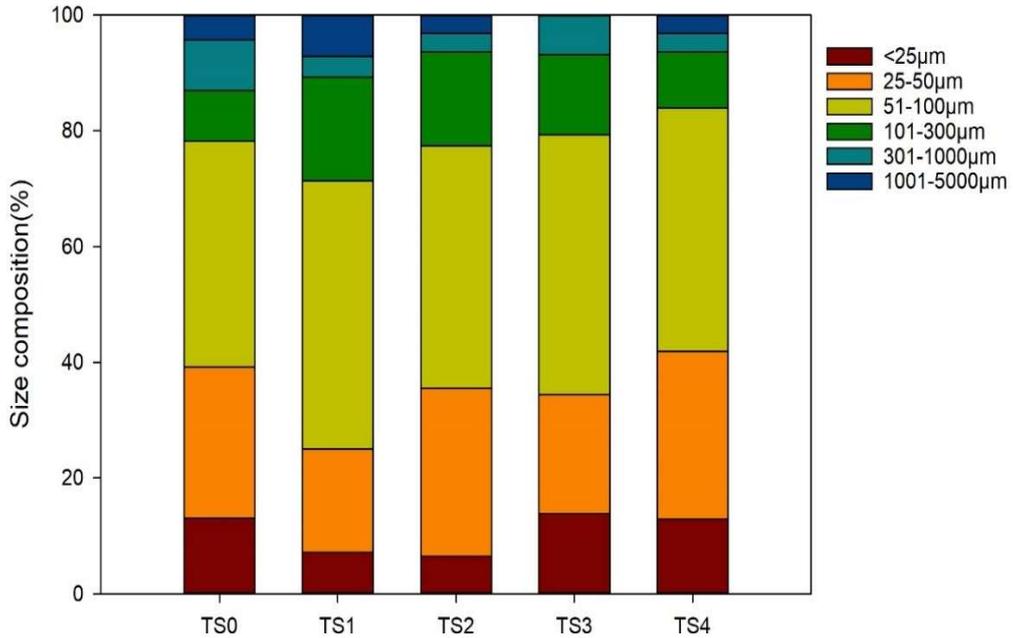


圖 36 十月微塑膠尺寸比例

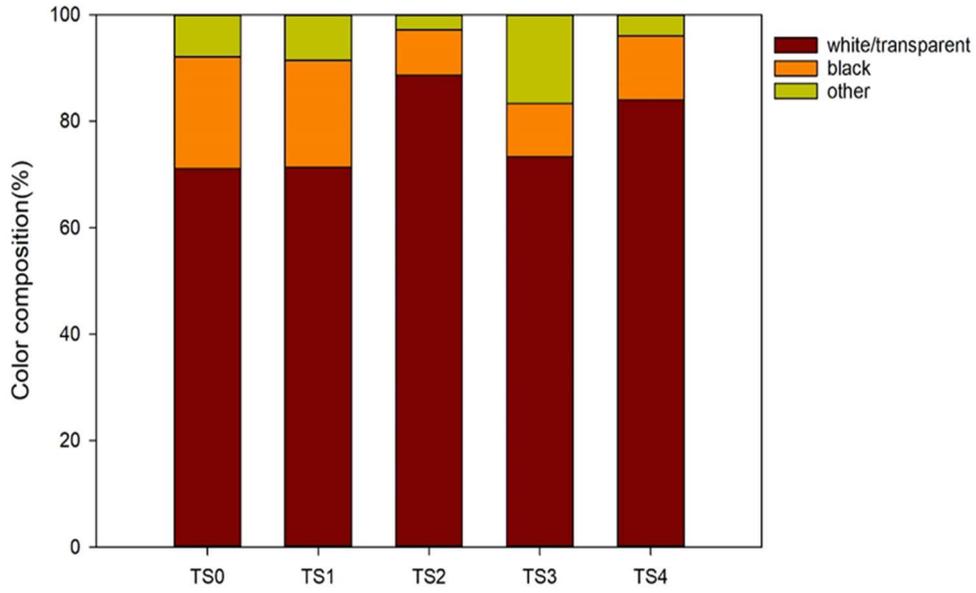


圖 37 四月微塑膠顏色比例

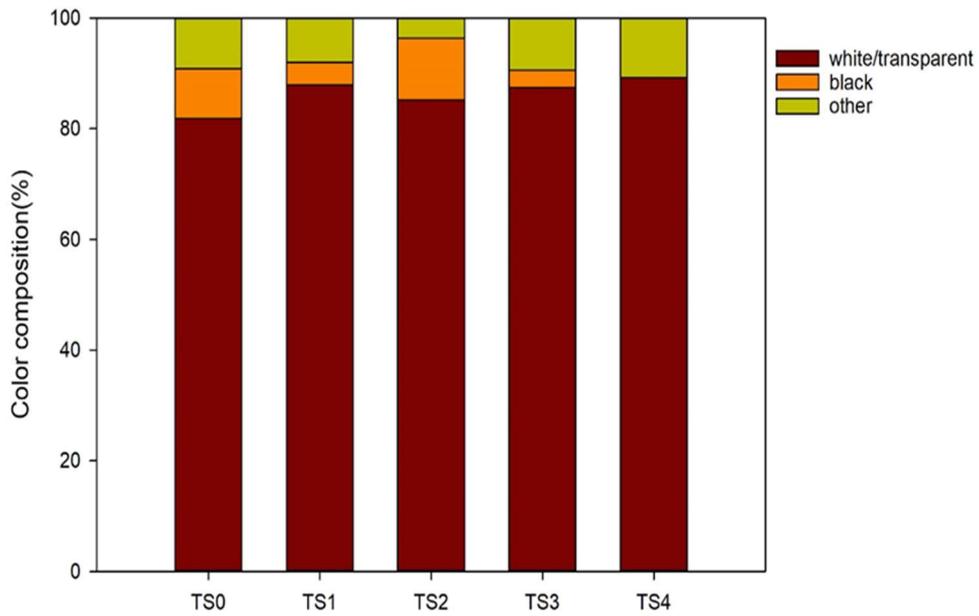


圖 38 五月微塑膠顏色比例

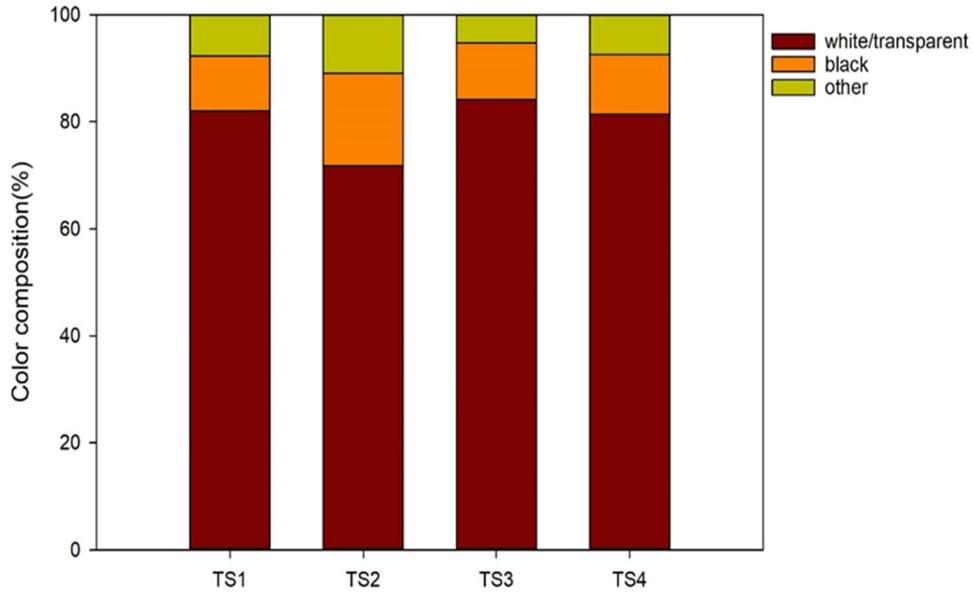


圖 39 七月微塑膠顏色比例

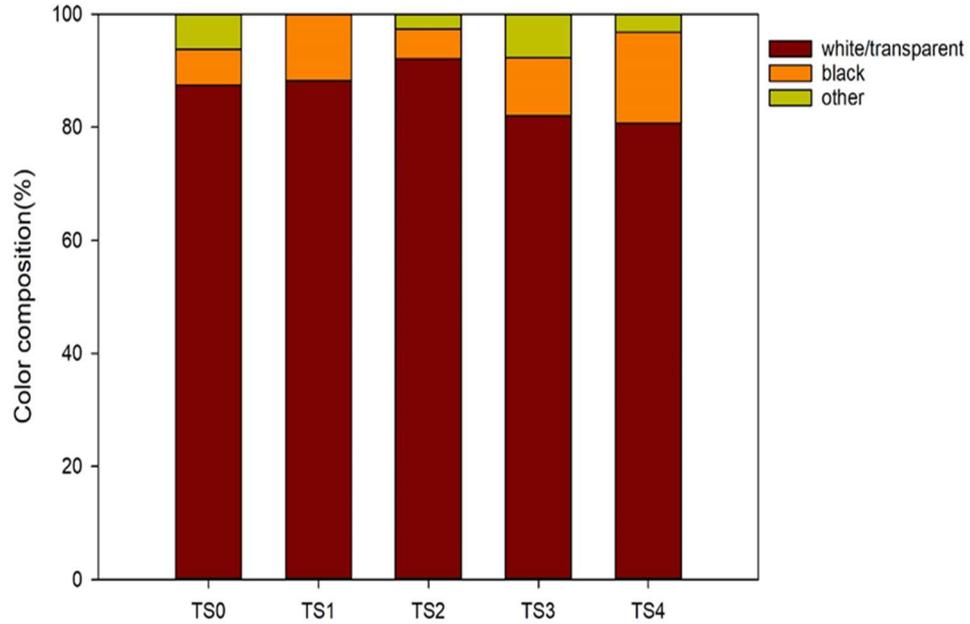


圖 40 八月微塑膠顏色比例

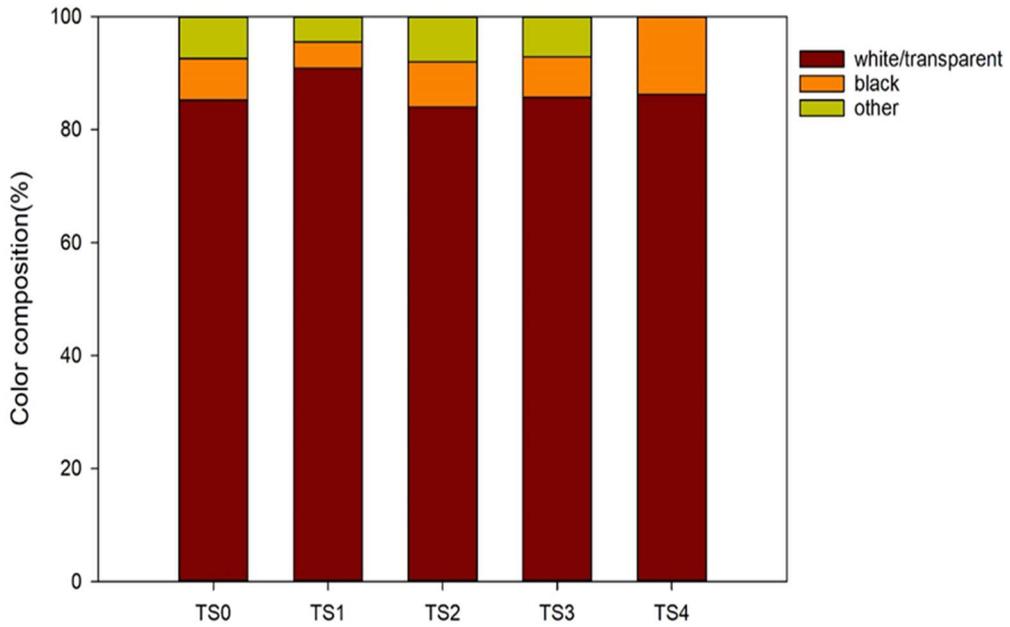


圖 41 九月微塑膠顏色比例

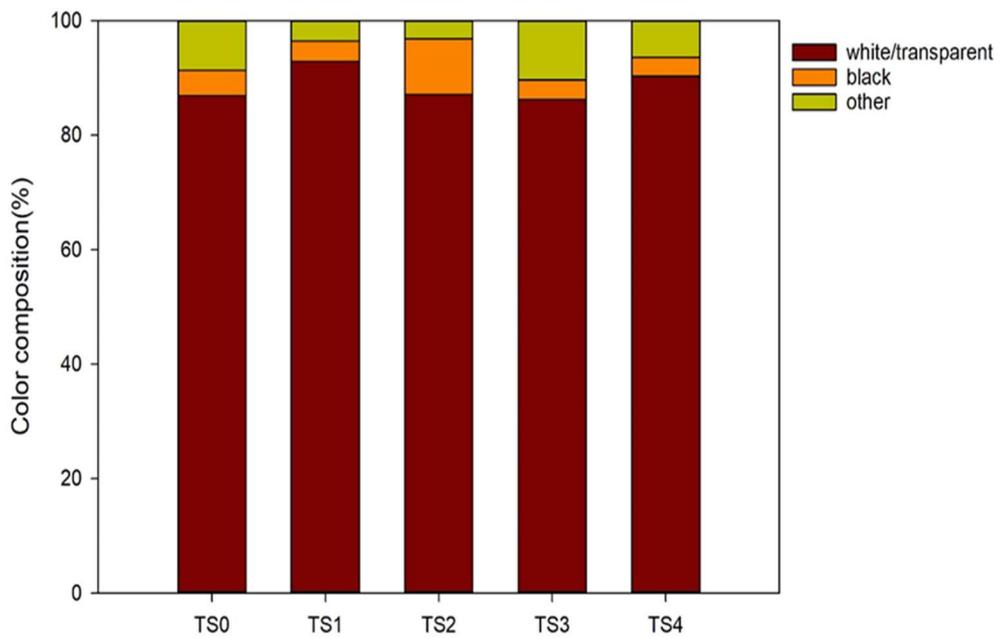
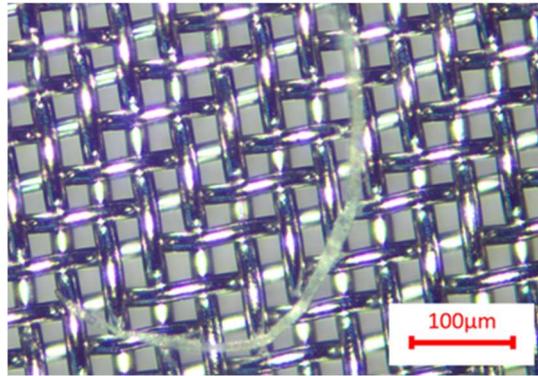
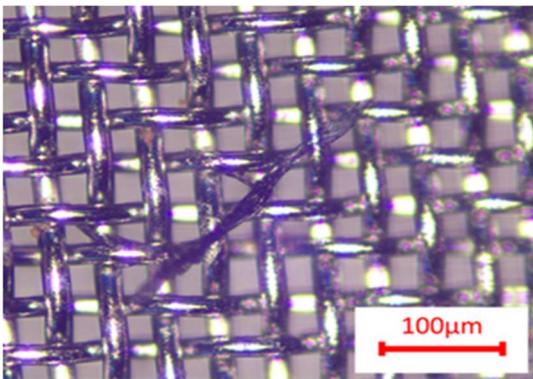


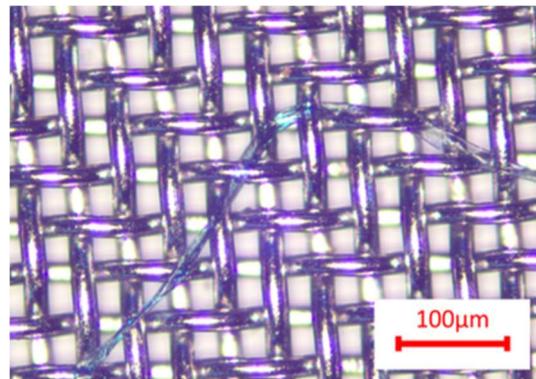
圖 42 十月微塑膠顏色比例



(a)透明/白色



(b)黑色



(c)其他

圖 43 以生物顯微鏡觀測微塑膠典型顏色樣式

4.2.3 微塑膠全球文獻之比較

目前國際對微塑膠採樣未有統一方式，包含各種微塑膠取樣方式如蝠網、浮游生物拖網、抽水過濾等，使用之不銹鋼篩網亦不一致，皆會影響後續數據分析相較(Liu et al.,2021; Michida et al., 2019)。另分析萃取方法和濃度單位(如 items/km²、items/m³、mg/m³ 或 mg/km² 等)不同，亦不易與全球有關微塑膠研究數據進行對比。表 4-15 為呈現本研究與國內研究結果。

表 18 本研究與國內外研究結果

區域/	採樣方法	平均濃度 (濃度範圍)	文獻來源
淡水河 臺灣	Manta 拖網 (330 μm)	2.5 ± 1.8 (個/m ³)	Wong et al. (2020)
東部海域 臺灣	Manta 拖網 (330 μm)	0.05 ± 0.03 (個/m ³) (ND~0.15)	Shiu et al. (2021)
西南海岸河口 臺灣	Manta 拖網 (330 μm)	0.36 ± 0.21 (個/m ³)	Chen et al. (2020)
萊茵河 瑞士-德國	Manta 拖網	0.04~9.97 (個/m ³)	Mani et al. (2020)
埃姆斯河 德國	driftnet (250 μm)	1.54 ± 1.54 (個/m ³)	Eibes et al. (2022)
安圖昂河 葡萄牙	抽水過濾 (0.055 mm mesh net)	58~1265 (個/m ³)	Rodrigues et al. (2018)
昭披耶河 泰國	Manta 拖網 (330 μm)	80±65 (個/m ³) (17.9 ~120.7)	Ta, A. T. and S. Babel (2020).
紐斯河 美國	Manta 拖網 (335 μm)	0.02~221 (個/m ³)	Kurki-Fox et al. (2023)
拉布拉他河 阿根廷	Neuston 拖網 (36 μm)	24 (個/m ³) (5~110)	Pazos et al. (2021)
漢江 韓國	Manta 拖網 (300 μm /333 μm)	7.0±12.9 (個/m ³) (0~42.9)	Park et al. (2020)
珠江口 香港	Manta 拖網 (333 μm)	3.973 ± 1.177 (個/m ³)	P.K. Cheung et al. (2018)
瑪納斯河 中國	不銹鋼桶	21 ± 3~49 ± 3 (個/L)	Wang et al. (2020)
西江 中國	不銹鋼桶 (75μ 不銹鋼篩網)	2.99~9.87 (個/L)	Wong et al. (2020)
淡水河 臺灣	不銹鋼瓶	22~46 (個/L)	本研究

伍、結論

綜合本研究結果獲得下列成果：

- 一、經不同月份於各採樣點採集之樣品分析結果，得知淡水河海口與季節性變化對 OPEs 具影響性，並可供政府對建立臺灣近岸海域 OPEs 背景之參據。
- 二、淡水河海口的四個採樣點進行採樣，可得知各採樣點人為活動對於 OPEs 之影響。
- 三、透過上述所有研究外，將可能釋放到環境中之 OPEs 進行風險評估。
- 四、完成微塑膠樣品分析後，可得知淡水流域和海口之水中微塑膠之分布特徵及濃度。依所得之結果，可提供台灣未來作為河川微塑膠之數值參考。
- 五、微塑膠濃度可能因季節、人類活動與土地使用而對數值產生影響，但特徵組成不論這些因素，所得之研究結果皆無太多差異。

參考文獻

- Andresen, J.A., Grundmann, A. and Bester, K. 2004. Organophosphorus flame retardants and plasticisers in surface waters. *Science of the Total Environment* 332(1-3), 155-166.
- Bekele, T.G., Zhao, H.X., Yang, J., Chegen, R.G., Chen, J.W., Mekonen, S. and Qadeer, A. 2021. A review of environmental occurrence, analysis, bioaccumulation, and toxicity of organophosphate esters. *Environmental Science and Pollution Research* 28(36), 49507-49528.
- Bollmann, U.E., Möller, A., Xie, Z., Ebinghaus, R. and Einax, J.W. 2012. Occurrence and fate of organophosphorus flame retardants and plasticizers in coastal and marine surface waters. *Water Research* 46(2), 531-538.
- Cristale, J., García Vázquez, A., Barata, C. and Lacorte, S. 2013a. Priority and emerging flame retardants in rivers: Occurrence in water and sediment, *Daphnia magna* toxicity and risk assessment. *Environment International* 59, 232-243.
- Cristale, J., Katsoyiannis, A., Chen, C.e., Jones, K.C. and Lacorte, S. 2013b. Assessment of flame retardants in river water using a ceramic dosimeter passive sampler. *Environmental Pollution* 172, 163-169.
- Cristale, J., Katsoyiannis, A., Sweetman, A.J., Jones, K.C. and Lacorte, S. 2013c. Occurrence and risk assessment of organophosphorus and brominated flame retardants in the River Aire (UK). *Environmental Pollution* 179, 194-200.
- Fries, E. and Puttmann, W. 2001. Occurrence of organophosphate esters in surface water and ground water in Germany. *Journal of Environmental Monitoring* 3(6), 621-626.
- Haggard, B.E., Galloway, J.M., Green, W.R. and Meyer, M.T. 2006. Pharmaceuticals and Other Organic Chemicals in Selected North-Central and Northwestern Arkansas Streams. *Journal of Environmental Quality*

35(4), 1078-1087.

- He, C., English, K., Baduel, C., Thai, P., Jagals, P., Ware, R.S., Li, Y., Wang, X., Sly, P.D. and Mueller, J.F. 2018. Concentrations of organophosphate flame retardants and plasticizers in urine from young children in Queensland, Australia and associations with environmental and behavioural factors. *Environmental Research* 164, 262-270.
- Hou, M., Shi, Y., Na, G. and Cai, Y. 2021. A review of organophosphate esters in indoor dust, air, hand wipes and silicone wristbands: Implications for human exposure. *Environment International* 146, 106261.
- Hu, Z.H., Yin, L.S., Wen, X.F., Jiang, C.B., Long, Y.N., Zhang, J.W. and Liu, R.Y. 2021. Organophosphate Esters in China: Fate, Occurrence, and Human Exposure. *Toxics* 9(11).
- Kim, S.D., Cho, J., Kim, I.S., Vanderford, B.J. and Snyder, S.A. 2007. Occurrence and removal of pharmaceuticals and endocrine disruptors in South Korean surface, drinking, and waste waters. *Water Research* 41(5), 1013-1021.
- Li, J., Xie, Z.Y., Mi, W.Y., Lai, S.C., Tian, C.G., Emeis, K.C. and Ebinghaus, R. 2017. Organophosphate Esters in Air, Snow, and Seawater in the North Atlantic and the Arctic. *Environmental Science & Technology* 51(12), 6887-6896.
- Luo, K., Zhang, R.R., Aimuzi, R., Wang, Y.Q., Nian, M. and Zhang, J. 2020. Exposure to Organophosphate esters and metabolic syndrome in adults. *Environment International* 143.
- Lv, K., Bai, L., Song, B.Y., Ma, X.D., Hou, M.M., Fu, J., Shi, Y.L., Wang, Y.W. and Jiang, G.B. 2022. Presence of organophosphate flame retardants (OPEs) in different functional areas in residential homes in Beijing, China. *Journal of Environmental Sciences* 115, 277-285.
- Martínez-Carballo, E., González-Barreiro, C., Sitka, A., Scharf, S. and Gans, O. 2007. Determination of selected organophosphate esters in the aquatic

environment of Austria. *Science of The Total Environment* 388(1), 290-299.

Noguera-Oviedo, K. and Aga, D. S. (2016), "Lessons learned from more than two decades of research on emerging contaminants in the environment," *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 316, pp. 242-251.

Quednow, K. and Püttmann, W. 2008. Organophosphates and Synthetic Musk Fragrances in Freshwater Streams in Hessen/Germany. *CLEAN – Soil, Air, Water* 36(1), 70-77.

Quintana, J.B. and Reemtsma, T. 2006. Potential of membrane-assisted solvent extraction for the determination of phosphoric acid triesters in wastewater samples by liquid chromatography-tandem mass spectrometry. *Journal of Chromatography A* 1124(1-2), 22-28.

Quintana, J.B., Rodil, R., LOPEsz-Mahia, P., Muniategui-Lorenzo, S. and Prada-Rodriguez, D. 2007. Optimisation of a selective method for the determination of organophosphorous triesters in outdoor particulate samples by pressurised liquid extraction and large-volume injection gas chromatography-positive chemical ionisation-tandem mass spectrometry. *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 388(5-6), 1283-1293.

Reemtsma, T., Quintana, J.B., Rodil, R., Garcí'a-López, M. and Rodri'guez, I. 2008. Organophosphorus flame retardants and plasticizers in water and air I. Occurrence and fate. *TrAC Trends in Analytical Chemistry* 27(9), 727-737.

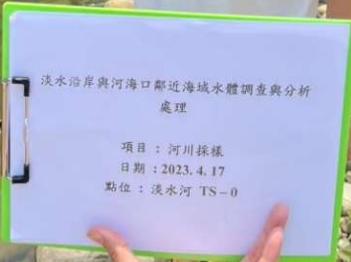
Rodil, R., Quintana, J.B. and Reemtsma, T. 2005. Liquid chromatography-tandem mass spectrometry determination of nonionic organophosphorus flame retardants and plasticizers in wastewater samples. *Analytical Chemistry* 77(10), 3083-3089.

Sundkvist, A.M., Olofsson, U. and Haglund, P. 2010. Organophosphorus flame retardants and plasticizers in marine and fresh water biota and in human milk. *Journal of Environmental Monitoring* 12(4), 943-951.

- Truong, D.A., Trinh, H.T., Le, G.T., Phan, T.Q., Duong, H.T., Tran, T.T.L., Nguyen, T.Q., Hoang, M.T.T. and Nguyen, T.V. 2023. Occurrence and ecological risk assessment of organophosphate esters in surface water from rivers and lakes in urban Hanoi, Vietnam. *Chemosphere* 331, 138805.
- Wang, R.M., Tang, J.H., Xie, Z.Y., Mi, W.Y., Chen, Y.J., Wolschke, H., Tian, C.G., Pan, X.H., Luo, Y.M. and Ebinghaus, R. 2015. Occurrence and spatial distribution of organophosphate ester flame retardants and plasticizers in 40 rivers draining into the Bohai Sea, north China. *Environmental Pollution* 198, 172-178.
- Wang, X., He, Y., Lin, L., Zeng, F. and Luan, T. 2014a. Application of fully automatic hollow fiber liquid phase microextraction to assess the distribution of organophosphate esters in the Pearl River Estuaries. *Science of The Total Environment* 470-471, 263-269.
- Wang, X., Zhu, Q.Q., Yan, X.T., Wang, Y.W., Liao, C.Y. and Jiang, G.B. 2020. A review of organophosphate flame retardants and plasticizers in the environment: Analysis, occurrence and risk assessment. *Science of the Total Environment* 731.
- Wang, X.W., He, Y.Q., Lin, L., Zeng, F. and Luan, T.G. 2014b. Application of fully automatic hollow fiber liquid phase microextraction to assess the distribution of organophosphate esters in the Pearl River Estuaries. *Science of the Total Environment* 470, 263-269.
- Wang, X.W., Liu, J.F. and Yin, Y.G. 2011. Development of an ultra-high-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry method for high throughput determination of organophosphorus flame retardants in environmental water. *Journal of Chromatography A* 1218(38), 6705-6711.
- Wei, G.L., Li, D.Q., Zhuo, M.N., Liao, Y.S., Xie, Z.Y., Guo, T.L., Li, J.J., Zhang, S.Y. and Liang, Z.Q. 2015. Organophosphorus flame retardants and plasticizers: Sources, occurrence, toxicity and human exposure.

Environmental Pollution 196, 29-46.

附 錄

淡水沿岸與河海口鄰近海域水體調查與分析處理(四月)					
採樣地點	大漢溪上游	採樣日期	4/17	採樣時間	8 hr
氣候條件	晴天	採樣人員	龐宏維、劉昕、李鴻昕、 陳軒轅、李俊宏		
現場測量結果					
溶氧 DO(電解法) (ppm)	0.12	水溫 (°C)	27.45		
pH 值	7.43	鹽度 (PSU)	0.20		
現場照片					
					
 <p>淡水沿岸與河海口鄰近海域水體調查與分析處理 項目：河川採樣 日期：2023.4.17 點位：淡水河 TS-0</p>					
備註				樣品編號	TS0

淡水沿岸與河海口鄰近海域水體調查與分析處理(四月)					
採樣地點	新月橋堤外道	採樣日期	4/17	採樣時間	8 hr
氣候條件	晴天	採樣人員	龐宏維、劉昕、李鴻昕、陳軒轅、李俊宏		
現場測量結果					
溶氧 DO(電解法)(ppm)	0.40	水溫(°C)	27.07		
pH 值	7.56	鹽度(PSU)	0.41		
現場照片					
					
					
備註				樣品編號	TS1

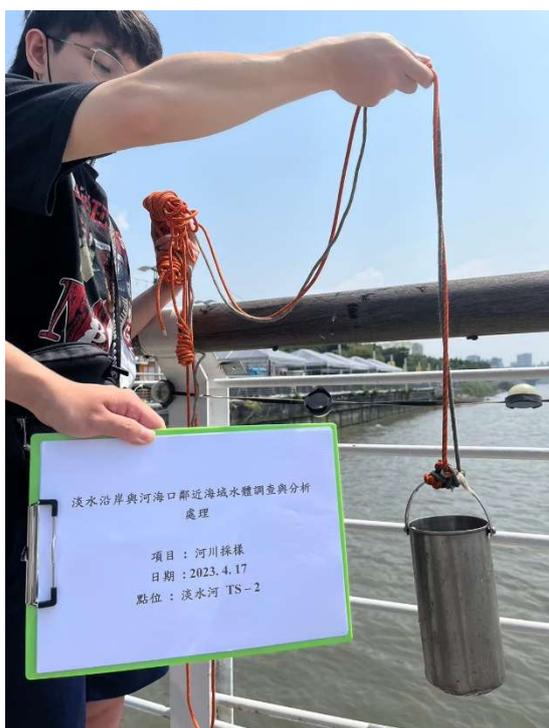
淡水沿岸與河海口鄰近海域水體調查與分析處理(四月)

採樣地點	大稻埕碼頭	採樣日期	4/17	採樣時間	8 hr
氣候條件	晴天	採樣人員	龐宏維、劉昕、李鴻昕、 陳軒轅、李俊宏		

現場測量結果

溶氧 DO(電解法) (ppm)	1.53	水溫 (°C)	26.51
pH 值	7.56	鹽度 (PSU)	4.13

現場照片



備註		樣品編號	TS2
----	--	------	-----

淡水沿岸與河海口鄰近海域水體調查與分析處理(四月)

採樣地點	關渡橋頭	採樣日期	4/17	採樣時間	8 hr
氣候條件	晴天	採樣人員	龐宏維、劉昕、李鴻昕、 陳軒轅、李俊宏		

現場測量結果

溶氧 DO(電解法) (ppm)	2.41	水溫 (°C)	25.27
pH 值	7.57	鹽度 (PSU)	16.56

現場照片



備註

樣品
編號

TS3

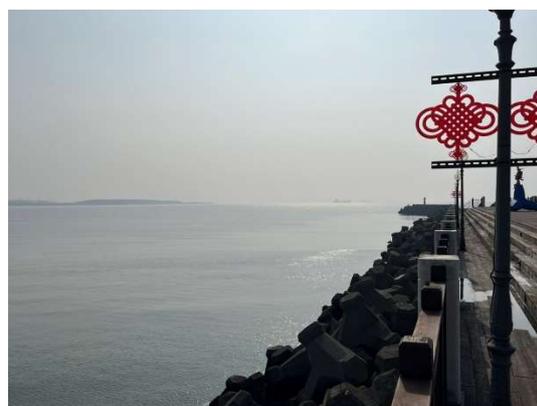
淡水沿岸與河海口鄰近海域水體調查與分析處理(四月)

採樣地點	淡水漁人碼頭	採樣日期	4/17	採樣時間	8hr
氣候條件	晴天	採樣人員	龐宏維、劉昕、李鴻昕、 陳軒轅、李俊宏		

現場測量結果

溶氧 DO(電解法) (ppm)	4.64	水溫 (°C)	25.85
pH 值	7.60	鹽度 (PSU)	32.12

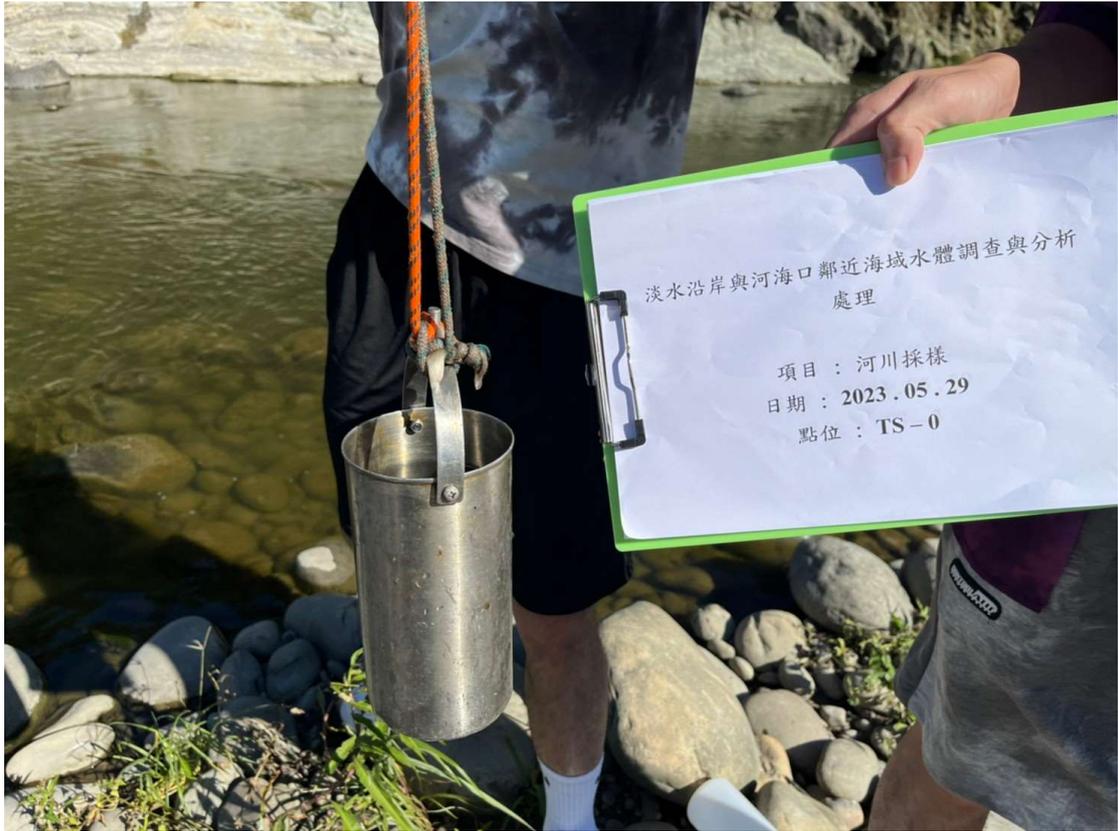
現場照片



備註

樣品
編號

TS4

淡水沿岸與河海口鄰近海域水體調查與分析處理(五月)					
採樣地點	大漢溪上游	採樣日期	5/29	採樣時間	8 hr
氣候條件	晴天	採樣人員	龐宏維、劉昕、李鴻昕、 陳軒轅、李俊宏		
現場測量結果					
溶氧 DO(電解法) (ppm)	5.48	水溫 (°C)	30.24		
pH 值	7.89	鹽度 (PSU)	0.22		
現場照片					
					
備註				樣品 編號	TS0

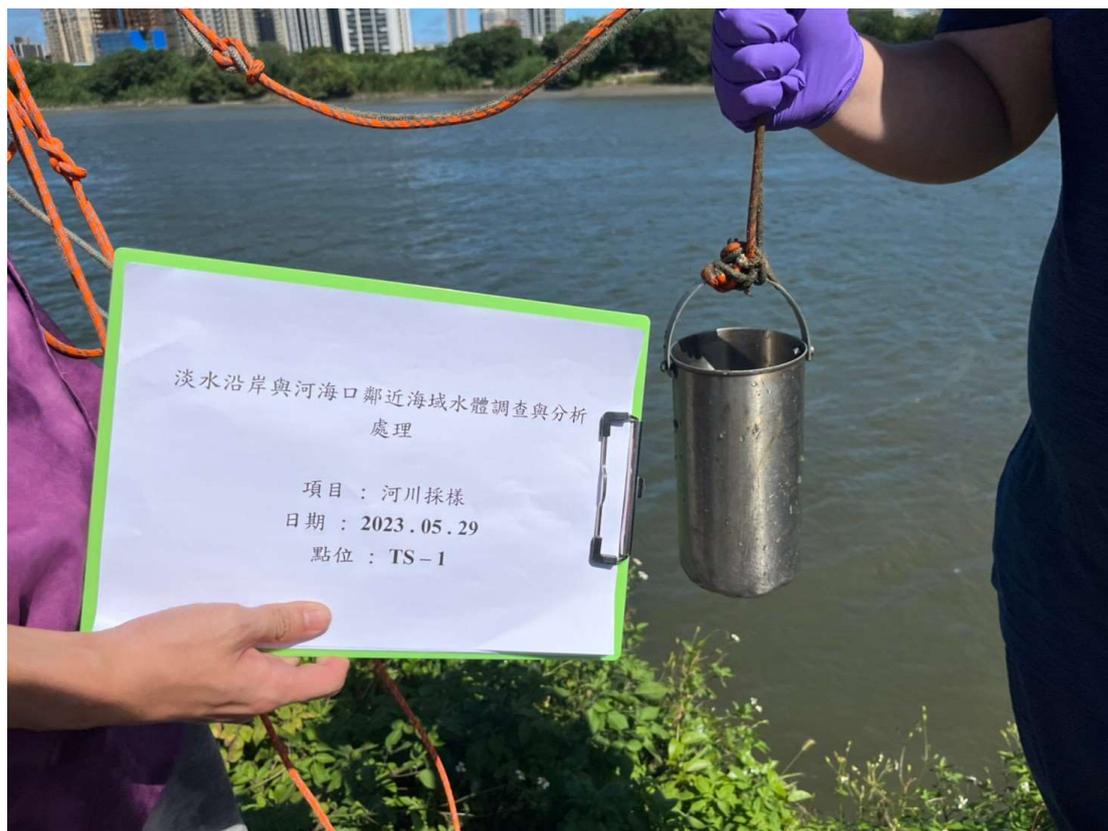
淡水沿岸與河海口鄰近海域水體調查與分析處理(五月)

採樣地點	新月橋堤外道	採樣日期	5/29	採樣時間	8 hr
氣候條件	晴天	採樣人員	龐宏維、劉昕、李鴻昕、 陳軒轅、李俊宏		

現場測量結果

溶氧 DO(電解法) (ppm)	2.98	水溫 (°C)	29.56
pH 值	7.87	鹽度 (PSU)	0.21

現場照片



備註		樣品編號	TS1
----	--	------	-----

淡水沿岸與河海口鄰近海域水體調查與分析處理(五月)

採樣地點	大稻埕碼頭	採樣日期	5/29	採樣時間	8 hr
氣候條件	晴天	採樣人員	龐宏維、劉昕、李鴻昕、 陳軒轅、李俊宏		

現場測量結果

溶氧 DO(電解法) (ppm)	4.85	水溫 (°C)	30.19
pH 值	7.77	鹽度 (PSU)	2.81

現場照片



備註		樣品 編號	TS2
----	--	----------	-----

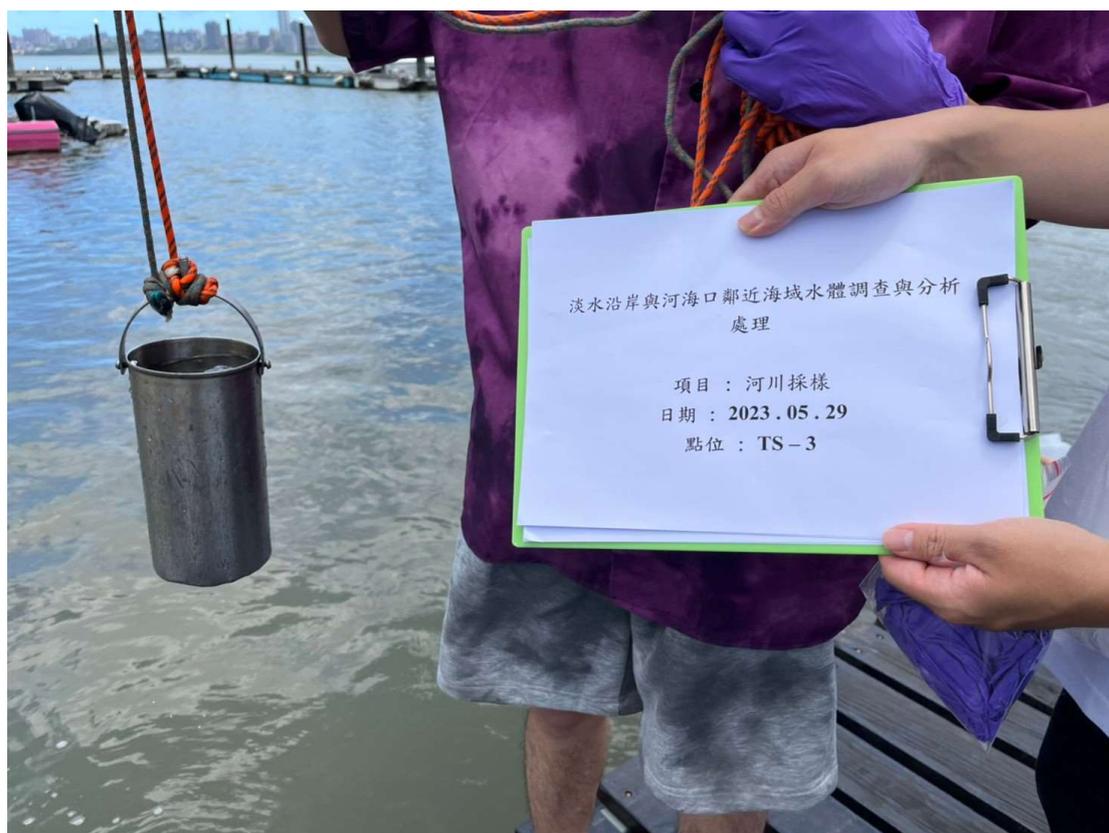
淡水沿岸與河海口鄰近海域水體調查與分析處理(五月)

採樣地點	關渡橋頭	採樣日期	5/29	採樣時間	8 hr
氣候條件	晴天	採樣人員	龐宏維、劉昕、李鴻昕、 陳軒轅、李俊宏		

現場測量結果

溶氧 DO(電解法) (ppm)	0.52	水溫 (°C)	28.37
pH 值	8.09	鹽度 (PSU)	18.34

現場照片



備註		樣品編號	TS3
----	--	------	-----

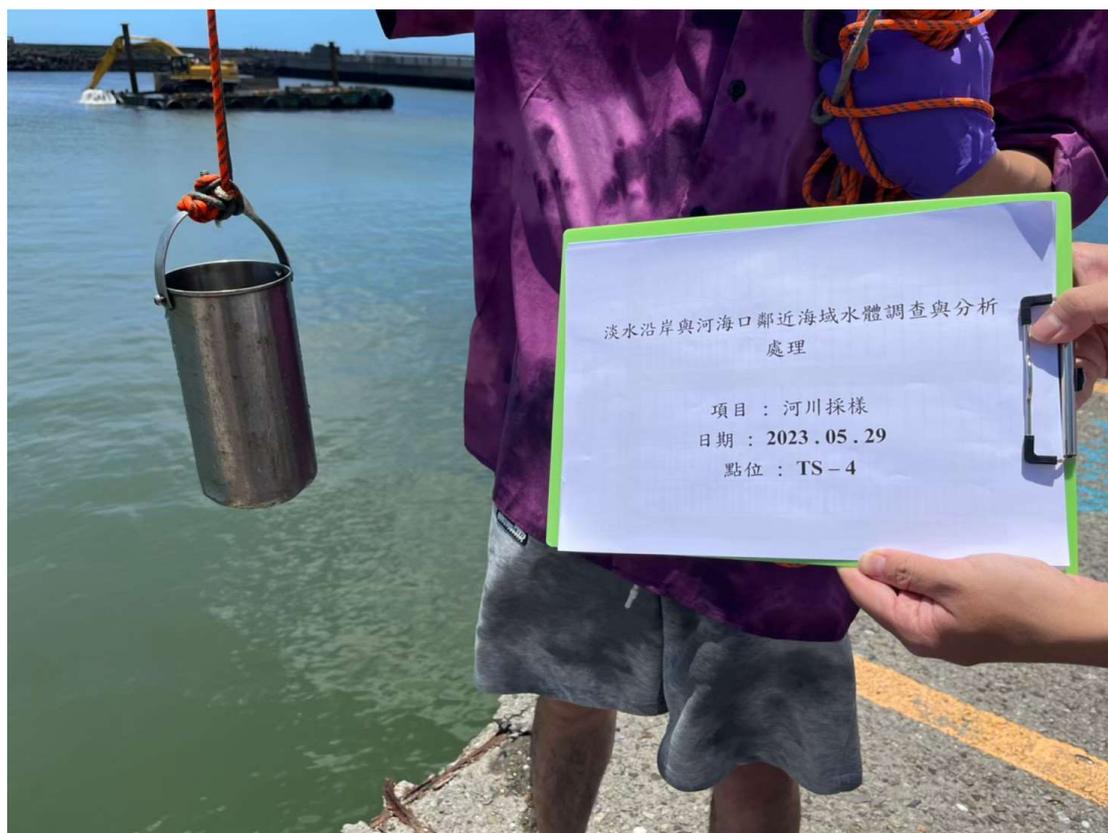
淡水沿岸與河海口鄰近海域水體調查與分析處理(五月)

採樣地點	淡水漁人碼頭	採樣日期	5/29	採樣時間	8 hr
氣候條件	晴天	採樣人員	龐宏維、劉昕、李鴻昕、 陳軒轅、李俊宏		

現場測量結果

溶氧 DO(電解法) (ppm)	3.03	水溫 (°C)	28.52
pH 值	7.83	鹽度 (PSU)	32.03

現場照片



備註		樣品編號	TS4
----	--	------	-----

淡水沿岸與河海口鄰近海域水體調查與分析處理(七月)					
採樣地點	新月橋堤外道	採樣日期	7/09	採樣時間	8 hr
氣候條件	晴天	採樣人員	龐宏維、劉昕、李鴻昕、 陳軒轅、李俊宏		
現場測量結果					
溶氧 DO(電解法) (ppm)	8.19	水溫 (°C)	32.39		
pH 值	7.11	鹽度 (PSU)	0.41		
現場照片					
					
備註				樣品編號	TS1

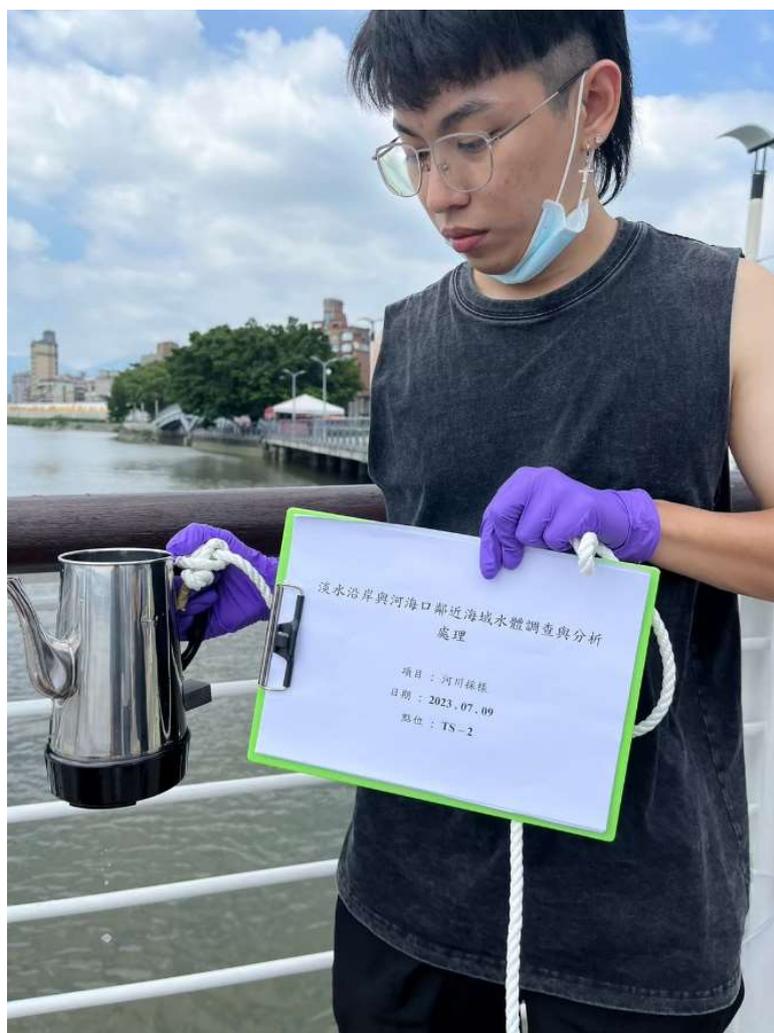
淡水沿岸與河海口鄰近海域水體調查與分析處理(七月)

採樣地點	大稻埕碼頭	採樣日期	7/09	採樣時間	8 hr
氣候條件	晴天	採樣人員	龐宏維、劉昕、李鴻昕、 陳軒轅、李俊宏		

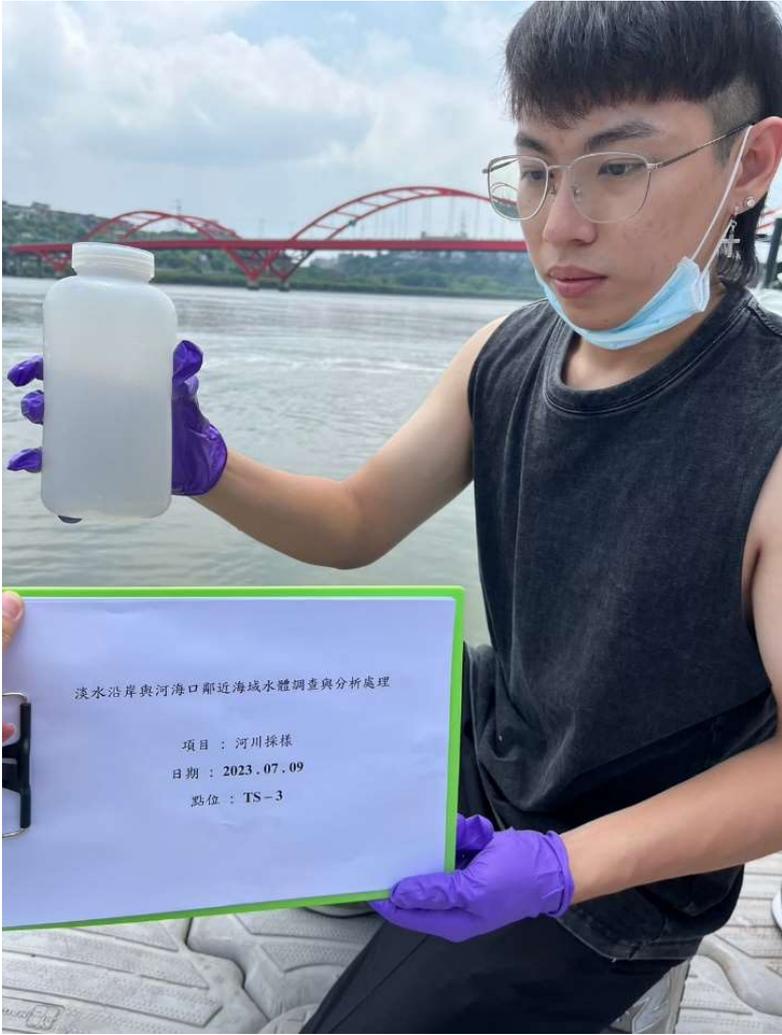
現場測量結果

溶氧 DO(電解法) (ppm)	9.10	水溫 (°C)	31.76
pH 值	7.08	鹽度 (PSU)	4.03

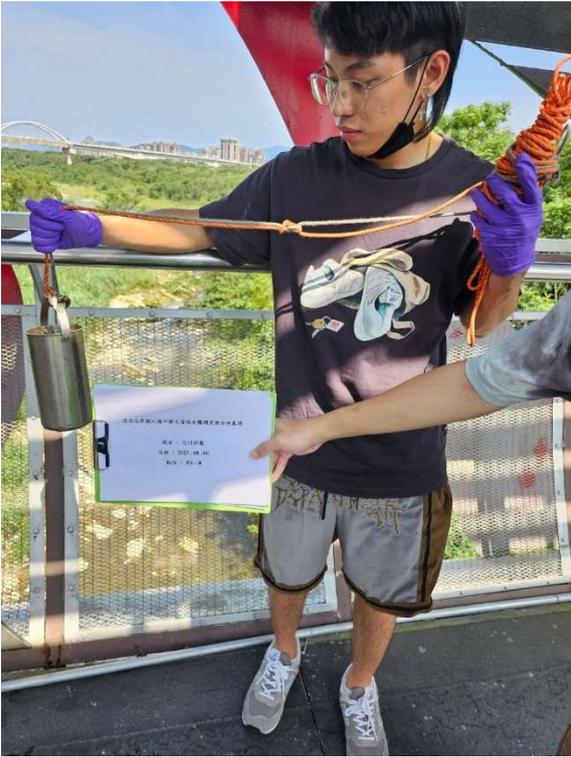
現場照片



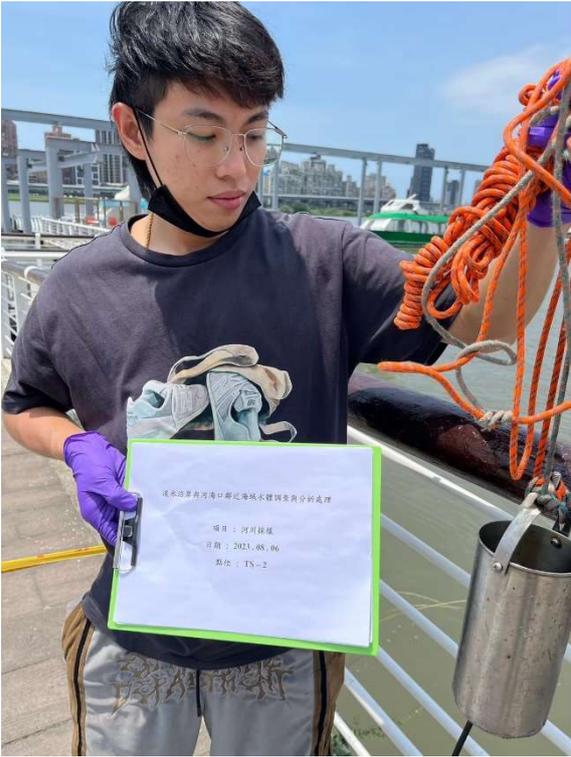
備註		樣品編號	TS2
----	--	------	-----

淡水沿岸與河海口鄰近海域水體調查與分析處理(七月)					
採樣地點	關渡橋頭	採樣日期	7/09	採樣時間	8 hr
氣候條件	晴天	採樣人員	龐宏維、劉昕、李鴻昕、 陳軒轅、李俊宏		
現場測量結果					
溶氧 DO(電解法) (ppm)	14.57	水溫 (°C)	31.96		
pH 值	7.01	鹽度 (PSU)	17.84		
現場照片					
					
備註				樣品 編號	TS3

淡水沿岸與河海口鄰近海域水體調查與分析處理(七月)					
採樣地點	淡水漁人碼頭	採樣日期	5/29	採樣時間	8 hr
氣候條件	晴天	採樣人員	龐宏維、劉昕、李鴻昕、 陳軒轅、李俊宏		
現場測量結果					
溶氧 DO(電解法) (ppm)	5.50	水溫 (°C)	30.83		
pH 值	7.11	鹽度 (PSU)	60.15		
現場照片					
					
備註				樣品編號	TS4

淡水沿岸與河海口鄰近海域水體調查與分析處理(八月)					
採樣地點	大漢溪上游	採樣日期	8/6	採樣時間	8 hr
氣候條件	晴天	採樣人員	劉昕、李鴻昕、陳軒轅、李俊宏		
現場測量結果					
溶氧 DO(電解法) (ppm)	2.96	水溫 (°C)	32.05		
pH 值	7.52	鹽度 (PSU)	0.52		
現場照片					
					
					
備註				樣品編號	TS0

淡水沿岸與河海口鄰近海域水體調查與分析處理(八月)					
採樣地點	新月橋堤外道	採樣日期	8/6	採樣時間	8hr
氣候條件	晴天	採樣人員	劉昕、李鴻昕、陳軒轅、李俊宏		
現場測量結果					
溶氧 DO(電解法)(ppm)	3.45	水溫(°C)	29.34		
pH 值	7.46	鹽度(PSU)	0.24		
現場照片					
					
					
備註				樣品編號	TS1

淡水沿岸與河海口鄰近海域水體調查與分析處理(八月)					
採樣地點	大稻埕碼頭	採樣日期	8/6	採樣時間	8 hr
氣候條件	晴天	採樣人員	劉昕、李鴻昕、陳軒轅、李俊宏		
現場測量結果					
溶氧 DO(電解法)(ppm)	2.34	水溫(°C)	28.47		
pH 值	7.49	鹽度(PSU)	0.25		
現場照片					
					
					
備註				樣品編號	TS2

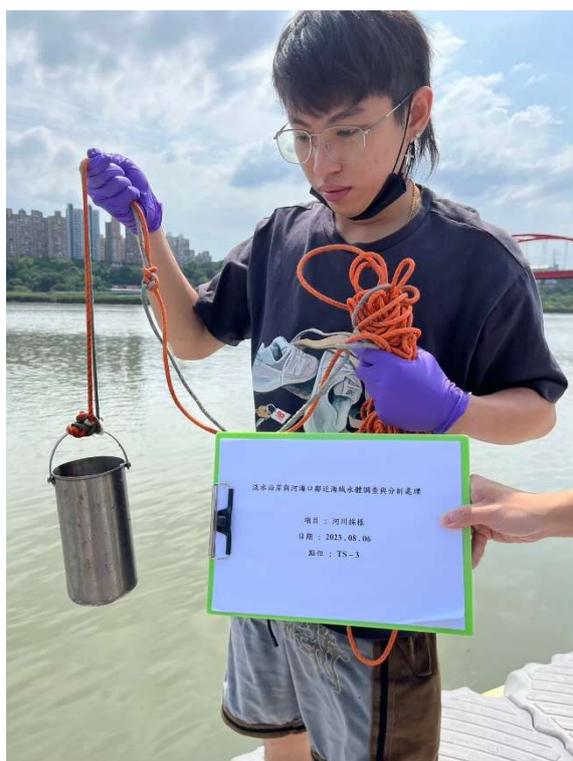
淡水沿岸與河海口鄰近海域水體調查與分析處理(八月)

採樣地點	關渡橋頭	採樣日期	8/6	採樣時間	8 hr
氣候條件	晴天	採樣人員	劉昕、李鴻昕、陳軒轅、李俊宏		

現場測量結果

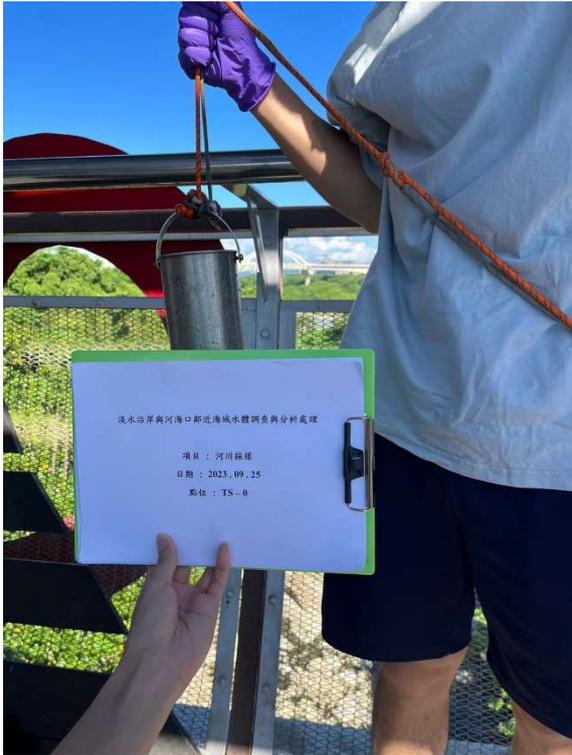
溶氧 DO(電解法) (ppm)	0.2	水溫 (°C)	28.33
pH 值	7.45	鹽度	2.9

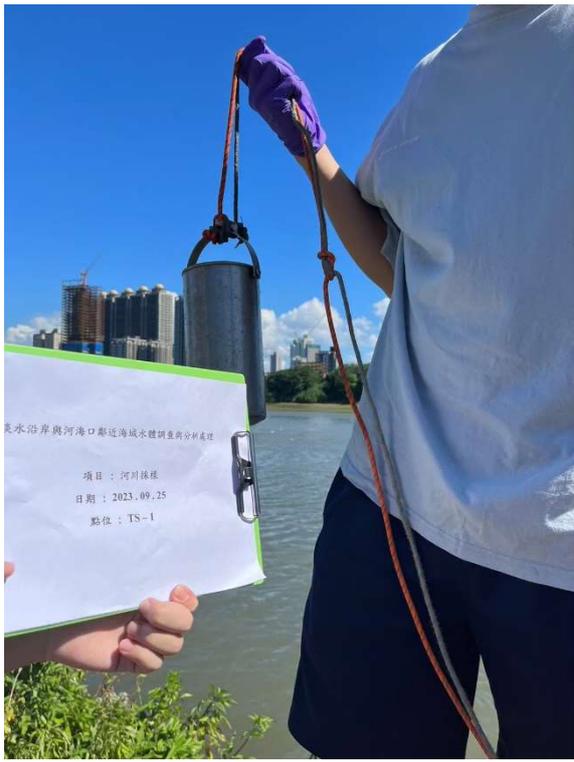
現場照片



備註		樣品編號	TS3
----	--	------	-----

淡水沿岸與河海口鄰近海域水體調查與分析處理(八月)					
採樣地點	淡水漁人碼頭	採樣日期	8/6	採樣時間	8 hr
氣候條件	晴天	採樣人員	劉昕、李鴻昕、陳軒轅、李俊宏		
現場測量結果					
溶氧 DO(電解法) (ppm)	1.54	水溫 (°C)	29.24		
pH 值	7.39	鹽度 (PSU)	46.33		
現場照片					
					
					
備註				樣品編號	TS4

淡水沿岸與河海口鄰近海域水體調查與分析處理(九月)					
採樣地點	大漢溪上游	採樣日期	9/25	採樣時間	8 hr
氣候條件	晴天	採樣人員	劉昕、李鴻昕、陳軒轅、李俊宏		
現場測量結果					
溶氧 DO(電解法)(ppm)	2.43	水溫 (°C)	30.63		
pH 值	7.65	鹽度	0.57		
現場照片					
					
					
備註				樣品編號	TS0

淡水沿岸與河海口鄰近海域水體調查與分析處理(九月)					
採樣地點	新月橋堤外道	採樣日期	9/25	採樣時間	8hr
氣候條件	晴天	採樣人員	劉昕、李鴻昕、陳軒轅、李俊宏		
現場測量結果					
溶氧 DO(電解法) (ppm)	2.18	水溫 (°C)	31.09		
pH 值	7.65	鹽度 (PSU)	0.42		
現場照片					
					
					
備註				樣品編號	TS1

淡水沿岸與河海口鄰近海域水體調查與分析處理(九月)

採樣地點	大稻埕碼頭	採樣日期	9/25	採樣時間	8 hr
氣候條件	晴天	採樣人員	劉昕、李鴻昕、陳軒轅、李俊宏		

現場測量結果

溶氧 DO(電解法) (ppm)	3.5	水溫 (°C)	30.32
pH 值	7.59	鹽度 (PSU)	1.24

現場照片



備註		樣品編號	TS2
----	--	------	-----

淡水沿岸與河海口鄰近海域水體調查與分析處理(九月)

採樣地點	關渡橋頭	採樣日期	9/25	採樣時間	8 hr
氣候條件	晴天	採樣人員	劉昕、李鴻昕、陳軒轅、李俊宏		

現場測量結果

溶氧 DO(電解法) (ppm)	0	水溫 (°C)	29.96
pH 值	7.86	鹽度 (PSU)	36.41

現場照片



備註

樣品
編號

TS3

淡水沿岸與河海口鄰近海域水體調查與分析處理(九月)

採樣地點	淡水漁人碼頭	採樣日期	9/25	採樣時間	8 hr
氣候條件	晴天	採樣人員	劉昕、李鴻昕、陳軒轅、李俊宏		

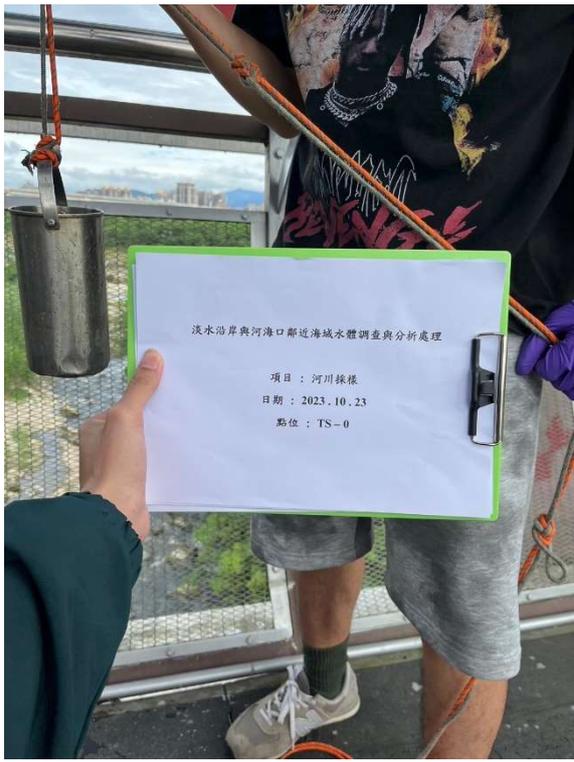
現場測量結果

溶氧 DO(電解法) (ppm)	0.15	水溫 (°C)	30.66
pH 值	7.61	鹽度 (PSU)	54.36

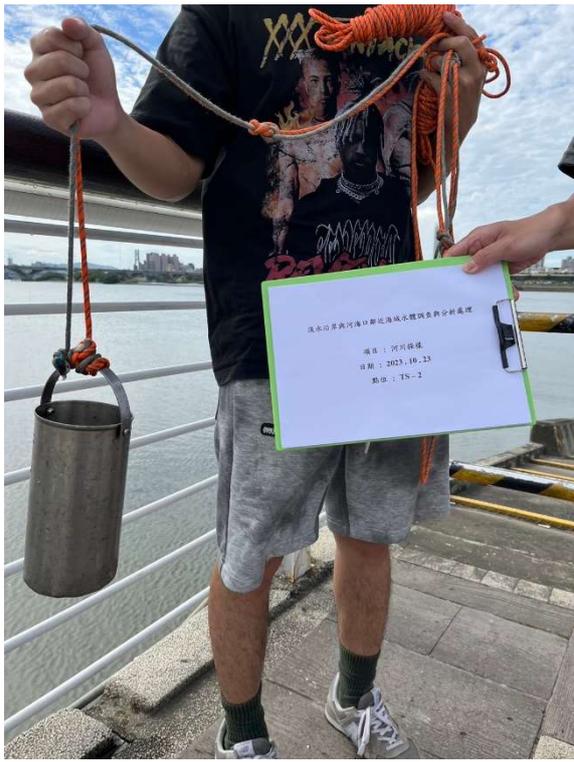
現場照片



備註		樣品編號	TS4
----	--	------	-----

淡水沿岸與河海口鄰近海域水體調查與分析處理(十月)					
採樣地點	大漢溪上游	採樣日期	10/25	採樣時間	8 hr
氣候條件	晴天	採樣人員	劉昕、李鴻昕、陳軒轅、李俊宏		
現場測量結果					
溶氧 DO(電解法)(ppm)	1.59	水溫(°C)	26.01		
pH 值	7.72	鹽度(PSU)	0.61		
現場照片					
 <p>淡水沿岸與河海口鄰近海域水體調查與分析處理</p> <p>項目：河川採樣 日期：2023.10.23 點位：TS-0</p>					
備註				樣品編號	TS0

淡水沿岸與河海口鄰近海域水體調查與分析處理(十月)					
採樣地點	新月橋堤外道	採樣日期	10/25	採樣時間	8 hr
氣候條件	晴天	採樣人員	劉昕、李鴻昕、陳軒轅、李俊宏		
現場測量結果					
溶氧 DO(電解法) (ppm)	0.61	水溫 (°C)	26.09		
pH 值	7.64	鹽度 (PSU)	0.41		
現場照片					
					
					
備註				樣品編號	TS1

淡水沿岸與河海口鄰近海域水體調查與分析處理(十月)					
採樣地點	大稻埕碼頭	採樣日期	10/25	採樣時間	8 hr
氣候條件	晴天	採樣人員	劉昕、李鴻昕、陳軒轅、李俊宏		
現場測量結果					
溶氧 DO(電解法) (ppm)	1.04	水溫 (°C)	25.07		
pH 值	7.68	鹽度 (PSU)	0.39		
現場照片					
					
					
備註				樣品編號	TS2

淡水沿岸與河海口鄰近海域水體調查與分析處理(十月)

採樣地點	關渡橋頭	採樣日期	10/25	採樣時間	8 hr
氣候條件	晴天	採樣人員	劉昕、李鴻昕、陳軒轅、李俊宏		

現場測量結果

溶氧 DO(電解法) (ppm)	0	水溫 (°C)	24.7
pH 值	7.75	鹽度 (PSU)	22.15

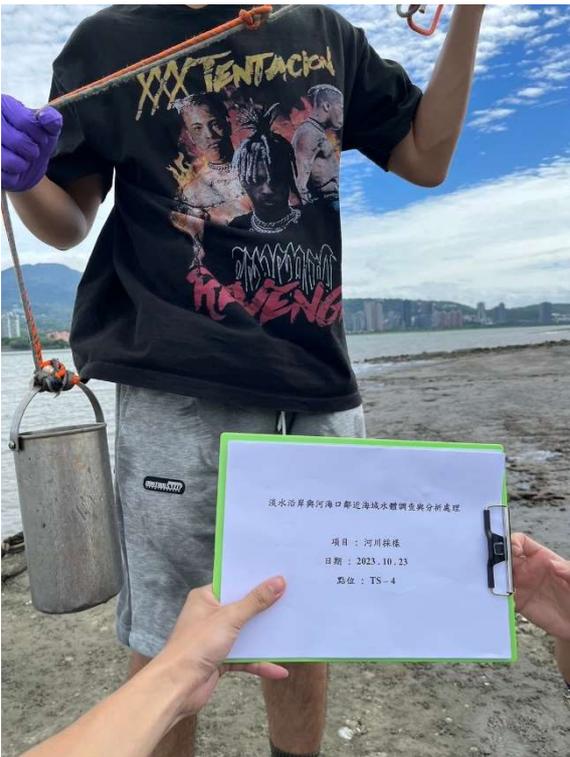
現場照片



備註

樣品
編號

TS3

淡水沿岸與河海口鄰近海域水體調查與分析處理(十月)					
採樣地點	淡水漁人碼頭	採樣日期	10/25	採樣時間	8 hr
氣候條件	晴天	採樣人員	劉昕、李鴻昕、陳軒轅、李俊宏		
現場測量結果					
溶氧 DO(電解法) (ppm)	0.38	水溫 (°C)	25.73		
pH 值	7.75	鹽度 (PSU)	39.18		
現場照片					
					
					
備註				樣品編號	TS4